



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL & ARCHITECTURE



N° D'ORDRE : D...../2017

THESE

Présentée pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux et Durabilité des Constructions

Par

BENAISSA Mohamed

**Valorisation de la bentonite de M'Zila
dans la formulation des bétons autoplaçants**

Soutenue le :

Devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|
| M. MEBROUKI Abdelkader | Professeur | Université de Mostaganem | Président |
| M. HOUARI SID AHMED Med | M.C.A | Université de Mascara | Examineur |
| M. LAOUFI Laid | M.C.A | Université de Mascara | Examineur |
| M. BENDANI Karim | Professeur | Université de Mostaganem | Encadreur |

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu Le tout clément et Le bienveillant de m'avoir donné la force et le courage pour pouvoir réaliser ce travail.

Ce travail a été accompli au **laboratoire de Recherche Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE)** de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université de Mostaganem.

Réaliser un travail de recherche et rédiger une thèse est le résultat des efforts non seulement d'une personne, mais de plusieurs. Certaines contribuent directement en fournissant des conseils, des commentaires constructifs ou un support technique. D'autres contribuent en apportant leur encouragement et leur soutien. Je tiens à remercier toutes ces personnes pour leur contribution dans ce travail.

En tout premier lieu, je voudrai manifester toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, monsieur **BENDANI Karim** professeur à l'université de Mostaganem, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses encouragements ainsi que la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordé durant mes quatre années de thèse.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **MEBROUKI Abdelkader**, Professeur à l'université de Mostaganem, pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance et à Messieurs **HOUARI SID AHMED Mohamed et LAOUFI Laid** Maîtres de Conférences à l'université de Mascara, qui ont bien voulu m'accorder de leur temps pour examiner mon mémoire de thèse.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à Madame **Nadia BELAS**, Monsieur **MISSOUM Hanifi** et Monsieur **Tahar KADRI** professeurs à l'université de Mostaganem, Monsieur **Khalil BELGUESMIA**, Monsieur **Omar BELARIBI** et Monsieur **Ahmed REZIGUA** de l'Université de Mostaganem pour leur contribution, soutien et leur encouragement.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs les **Directeurs des cimenteries de ZAHANA et OGGAZ et de l'unité de BENTAL de Mostaganem** qui m'ont autorisé à effectuer les travaux expérimentaux au sein de leur laboratoire ainsi que tous les ingénieurs et les techniciens et tout particulièrement Messieurs **ARRAB A.E.K et SI HAMDY Aissa**.

Je témoigne toute ma reconnaissance à mes amis et collègues, **Khalil, Aziz, Smail, Iakhder, Omar, Mohamed, Said, Hamou, Nesrine, Fouzia, Zoulikha, Nacira, Naima**.

Je terminerai en remerciant du tout mon cœur ma famille qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection.

Je leur dédie ce mémoire.

Sommaire

- Liste des Figures
- Liste des tableaux
- Résumé
- Abstract
- الملخص

| | |
|------------------------------|-----------|
| Introduction générale | 01 |
|------------------------------|-----------|

Première partie : Synthèse bibliographique

| | |
|--|-----------|
| Chapitre I : Généralité sur le béton autoplaçant et la durabilité | 05 |
|--|-----------|

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 1. BETON AUTOPLAÇANT | 06 |
|-----------------------------|-----------|

| | |
|---|----|
| 1.1 Introduction | 06 |
| 1.2 Historique du béton autoplaçant | 06 |
| 1.3. Spécification de la composition des BAP | 07 |
| 1.3.1 Un volume de pâte élevé | 07 |
| 1.3.2 Une quantité de fines ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$) importante | 07 |
| 1.3.3 L'emploi de superplastifiants | 08 |
| 1.3.4 L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau) | 08 |
| 1.3.5 Un faible volume de gravillon | 10 |
| 1.4 Le béton autoplaçant et le béton ordinaire | 10 |
| 1.5 Les avantages d'utilisation du béton autoplaçant | 12 |
| 1.5.1 La mise en œuvre | 12 |
| 1.5.2 La qualité du béton | 12 |
| 1.5.3 La conception | 13 |
| 1.6 Formulation d'un béton autoplaçant | 13 |
| 1.6.1 Principes de formulation | 13 |
| 1.6.2 Méthodes de formulation des bétons autoplaçants | 14 |
| 1.6.3 Différentes méthodes de formulation | 15 |
| 1.6.3.1 Méthode Japonaise | 15 |
| 1.6.3.2 Méthode Suédoise | 15 |
| 1.6.3.3 Méthode Française : Méthode française (LCPC) | 16 |
| 1.6.3.4 Autres Méthodes | 16 |
| 1.6.4 Les Propriétés Essentielles Recherchées | 17 |
| 1.6.5 Les essais de caractérisation des bétons autoplaçants | 18 |
| 1.6.5.1 Essai d'étalement | 19 |
| 1.6.5.2 L'essai du la boîte en L | 20 |
| 1.6.5.3 L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel » | 21 |
| 1.6.5.4 Méthode du tamis | 21 |
| 1.6.5.5 Essai J-Ring | 22 |
| 1.7 Conclusion | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 2. DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT | 23 |
| 2.1 Introduction | 23 |
| 2.2 Durabilité et économie | 25 |
| 2.3 Béton durable et béton résistant | 25 |
| 2.3.1 La carbonatation | 27 |
| 2.3.2 La corrosion des armatures | 27 |
| 2.3.3 Action des sulfates | 28 |
| 2.3.3.1 Mécanismes d'attaque | 29 |
| 2.3.4 Action des acides | 30 |
| 2.3.4.1. Mécanismes d'attaque acide | 30 |
| 2.3.5 Retrait | 32 |
| 2.3.5.1 Retrait plastique | 32 |
| 2.3.5.2 Retrait endogène | 33 |
| 2.3.5.3 Retrait de dessiccation | 33 |
| 2.3.5.4 Le retrait thermique | 34 |
| 2.4 Conclusion | 34 |
| | |
| Chapitre II : Les ajouts minéraux et la bentonite | 35 |
| | |
| 1. LES AJOUTS MINERAUX | 36 |
| 1.1 Introduction | 36 |
| 1.2 Classification des ajouts minéraux | 37 |
| 1.2.1 Principaux ajouts minéraux inertes | 37 |
| 1.2.1.1 Fillers calcaires | 37 |
| 1.2.1.2 Poussière | 38 |
| 1.2.2 Ajouts minéraux actifs | 39 |
| 1.2.2.1 Pouzzolane | 39 |
| 1.2.2.2 Fumée de silice | 40 |
| 1.2.2.3 Laitier de haut fourneau | 42 |
| 1.2.2.4 Cendres volantes | 43 |
| 1.2.2.5 Métakaolins | 45 |
| 1.3 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil | 46 |
| 1.3.1 Intérêt du point de vue économique | 46 |
| 1.3.2 Intérêt du point de vue technique | 47 |
| 1.3.3 L'utilisation des ajouts en Algérie | 47 |
| 1.4 Hydratation des ciments pouzzolaniques | 48 |
| 1.5 Influence des ajouts minéraux les caractéristiques du béton autoplaçant | 49 |
| 1.5.1 Influence des ajouts sur les caractéristiques à l'état frais | 49 |
| 1.5.2 Influence des ajouts sur les performances mécaniques | 50 |
| 1.5.3 Influence des ajouts sur la durabilité du béton autoplaçant | 52 |
| 1.5.3.1 Les attaques acides | 52 |
| 1.5.3.2 Les attaques sulfatiques | 53 |
| 1.5.3.3 Carbonatation | 55 |
| 1.5.3.4 Retrait | 56 |
| 1.5.3.5 Comparaison de retrait du béton vibrée et du béton autoplaçant | 59 |
| 1. 6 Conclusion | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 2. LA BENTONITE | 64 |
| 2.1 Introduction | 64 |
| 2.2 Définition | 65 |
| 2.3 Historique de la bentonite | 66 |
| 2.4 Les gisements de bentonites | 67 |
| 2.4.1 La bentonite du Wyoming | 67 |
| 2.4.2 Gisements américains de bentonite Etats –Unis | 67 |
| 2.4.3 Canada | 67 |
| 2.4.4 La bentonite Italienne | 67 |
| 2.4.5 Allemagne | 68 |
| 2.4.6 Les gisements d'argiles bentoniques en Algérie | 68 |
| 2.5 Contexte géologique | 68 |
| 2.6 Occurrence de la bentonite en Algérie | 69 |
| 2.7 Variétés des bentonites | 69 |
| 2.8 Présentation du gisement de M'ZILA | 69 |
| 2.9 Domaine d'utilisation de la bentonite | 71 |
| 2.10 Propriété des bentonites | 74 |
| 2.10.1 Propriétés physiques | 74 |
| 2.10.1.1 Forme naturelle et finesse des particules | 74 |
| 2.10.1.2 Poids spécifique | 74 |
| 2.10.1.3 Gonflement | 74 |
| 2.10.1.4 Viscosité | 75 |
| 2.10.1.5 Absorption et adsorption | 75 |
| 2.10.2 Propriétés chimiques | 75 |
| 2.10.2.1 Composition | 75 |
| 2.10.2.2 PH des suspensions | 75 |
| 2.11 Utilisation de la bentonite comme ajout dans le ciment | 76 |
| 2.12 Conclusion | 79 |

Deuxième partie : Etude expérimentale

| | |
|--|-----------|
| Chapitre III: Matériaux et méthodes | 82 |
| 1. INTRODUCTION | 83 |
| 2. PROGRAMME EXPERIMENTAL | 83 |
| 3. MATERIAUX UTILISES | 85 |
| 3.1 Le ciment | 85 |
| 3.2 Les granulats | 86 |
| 3.4 La bentonite | 88 |
| 3.4.1 Préparation de la bentonite calcinée | 88 |
| 3.4.2 Granulométrie | 89 |
| 3.4.3 Diffraction aux rayons X de la bentonite naturelle et calcinée | 90 |
| 3.4.1 Principe de la diffraction aux rayons X sur poudre | 90 |
| 3.4.2 Composition chimique et physique de la bentonite | 92 |
| 3.5 Adjuvant | 93 |

| | |
|---|------------|
| 3.6 L'eau de gâchage | 95 |
| 3.7 Conclusion | 95 |
| 4. LES METHODES | 95 |
| 4.1 Introduction | 95 |
| 4.2 Les essais sur la pâte du ciment et des mortiers | 96 |
| 4.2.1 Caractéristiques physiques des pâtes de ciment | 96 |
| 4.2.1.1 Détermination de la consistance normale | 96 |
| 4.2.1.2 Détermination du temps de prise | 97 |
| 4.2.1.3 Composition chimique des mélanges | 98 |
| 4.2.4 Les essais sur le mortier | 98 |
| 4.2.2.1 Formulation des mortiers | 98 |
| 4.2.2.1 Confection des mortiers | 99 |
| 4.2.2.2 Essais Mécaniques | 99 |
| 4.3 Les essais sur le béton autoplaçant | 102 |
| 4.3.1 Compositions des bétons | 103 |
| 4.3.2 Confection des bétons | 103 |
| 4.3.3 Les essais du béton à l'état frais | 104 |
| 4.3.3.1 Essai d'étalement | 104 |
| 4.3.3.2 Essai de boîte en L | 107 |
| 4.3.3.3 Essai de stabilité au tamis | 108 |
| 4.3.3.4 Essai de J-Ring | 109 |
| 4.3.4 Essais sur bétons durcis | 110 |
| 4.3.4.1 Les essais de compression | 110 |
| 4.3.4.2 Essais de Durabilité | 111 |
| a. Attaque des bétons autoplaçants par les acides | 111 |
| b. Attaque des bétons autoplaçants par le sulfate | 113 |
| c. Carbonatation naturelle | 115 |
| d. Mesure du retrait | 115 |
| 4.4 Conclusion | 116 |
| Chapitre IV : Résultats et discussions | 117 |
| 1. INTRODUCTION | 118 |
| 2. LES LIANTS ET LES MORTIERS | 118 |
| 2.1 Les liants | 118 |
| 2.1.1. Les surfaces spécifiques Blaine des différents mélanges | 118 |
| 2.1.2 La composition chimique des matériaux utilisés | 119 |
| 2.1.3 La pâte du ciment | 120 |
| 2.1.3.1 La prise et la consistance | 120 |
| 2.2 Résistance mécanique des mortiers | 122 |
| 2.2.1 La résistance à la traction | 122 |
| 2.2.2 La résistance à la compression | 123 |
| 2.2.3 Etude de l'activité pouzzolanique de la bentonite calcinée | 125 |
| 2.2.3.1 La pouzzolanité | 125 |
| 2.2.3.2 Evaluation de l'activité pouzzolanique de la bentonite calcinée | 126 |

| | |
|---|------------|
| 2.3 Conclusion | 127 |
| 3. LE BETON AUTOPLACANT | 128 |
| 3.1 Introduction | 128 |
| 3.2 Résultat des essais à l'état frais | 128 |
| 3.2.1 Étalement. | 128 |
| 3.2.2 Résistance à la ségrégation dynamique | 129 |
| 3.2.3 Résistance à la ségrégation statique | 131 |
| 3.2.3 L'essai de J-Ring | 132 |
| 3.2.4 Masse volumique | 133 |
| 3.3 Résultat des essais sur bétons durcis | 133 |
| 3.3.1 Evolution des résistances mécaniques en compression | 133 |
| 3.4 Résultat de la durabilité | 135 |
| 3.4.1 Résultat des attaques acides | 135 |
| 3.4.1.1 Acide H ₂ SO ₄ | 135 |
| 3.4.1.2 Acide HCL | 138 |
| 3.4.1.3 Etude comparative | 141 |
| 3.4.2 Résultat de l'attaque sulfate Na ₂ SO ₄ | 142 |
| 3.4.3 Carbonatation naturelle | 144 |
| 3.4.4 Retrait | 147 |
| 3.4.4.1 Retrait total | 147 |
| 3.4.4.2 Retrait endogène | 147 |
| 3.4.4.3 Retrait de dessiccation (ou de séchage) | 148 |
| 3.5 Conclusion | 149 |
| Conclusion Générale | 151 |
| Perspectives et recommandations | 153 |

Liste des Figures

Chapitre I : Généralité le béton autoplaçant et la durabilité

| | |
|---|----|
| Fig. I.1 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg, 2001] | 8 |
| Fig. I.2 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides d'après [Hasni ,1999]) | 9 |
| Fig. I.3 : Optimisation du dosage agent de viscosité-superplastifiant, d'après [Tangtermsirikuls ,1991] | 9 |
| Fig. I.4 : Aspect à l'état frais d'un béton ordinaire plastique et d'un béton auoplaçant [Turcry ,2004] | 11 |
| Fig. I.5 : Application du BAP dans la préfabrication [FEBELCEM, 2005] | 12 |
| Fig. I.6 : Bâtiment industriel complexe, réalisé en BAP coulé sur chantier [FEBELCEM, 2005] | 13 |
| Fig. I.7 : Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement du béton autoplaçant | 20 |
| Fig. I.8 : Essai de la boîte en L | 20 |
| Fig. I.9 : Essai de l'entonnoir en forme de V | 21 |
| Fig. I.10 : Essai de la stabilité au tamis | 22 |
| Fig. I.11 : Essai J. Ring | 22 |

Chapitre II : Les ajouts minéraux et la bentonite

| | |
|---|----|
| Fig. II.1 : Filler calcaire | 38 |
| Fig. II.2 : Pouzzolane naturelle | 39 |
| Fig. II.3 : Fumée de silice | 42 |
| Fig. II.4 : Laitier de haut fourneau | 43 |
| Fig. II.5 : Diagramme ternaire de KEIL-RANKIN, d'après Minoux (1994) | 44 |
| Fig. II.6 : Cendre volante | 44 |
| Fig. II.7 : Spectres d'analyse thermique (ATG/ATD) de la kaolinite [Samet et al. 2007] | 46 |
| Fig. II.8 : Etalement des bétons autoplaçants [Rackel, 2001] | 50 |
| Fig. II.9 : Evolution des résistances à la compression au cours du temps et en fonction de la nature du liant [Davood et al. ,2015] | 51 |
| Fig. II.10 : Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [Rahmani et al. ,2008] | 52 |
| Fig. II.11 : Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en (-a- H ₂ SO ₄ -b-5% HCl.) [Belaribi, 2015] | 53 |
| Fig. II.12 : Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [Siad et al. ,2010] | 54 |
| Fig. II.13 : Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans les solutions (-a- 5% Na ₂ SO ₄ -b-5% MgSO ₄) [Belairibi ,2015] | 55 |
| Fig. II.14 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [Said ,2010] | 55 |
| Fig. II.15 : Évolution du retrait endogène dans le temps [Bouhamou et al., 2014] | 56 |
| Fig. II.16 : Évolution du retrait de dessiccation dans le temps [Bouhamou et al. 2014] | 57 |
| Fig. II.17 : Retrait de dessiccation en fonction de la perte de la masse [Bouhamou et al., 2014] | 57 |

| | |
|--|----|
| Fig. II.18 : Retrait total en fonction du temps [Bouhamou et al. 2014] | 58 |
| Fig. II.19 : Evolution du retrait des différents BAP. (RT : Retrait total, RE : Retrait endogène) [Ayed et al., 2009] | 58 |
| Fig. II.20 : Retrait plastique de B A P et de béton vibré de structure (T = 20°C, 50% HR) [Gram, 1999] | 59 |
| Fig. II.21 : Retrait plastique des formules de BA P et de bétons vibrés dérivés [Turcry ,2004] | 59 |
| Fig. II.22 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu, 1998] | 60 |
| Fig. II.23 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [Pons, 2003] | 61 |
| Fig. II.24 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [Persson, 1999] | 61 |
| Fig. II.25 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu, 1998] | 62 |
| Fig. II.26 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [Sonebi, 1999] | 62 |
| Fig. II.27 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [Sakata, 1998] | 63 |
| Fig. II.28 : Structures cristallines de trois types d'argiles | 65 |
| Fig. II.29 : Production nationale de bentonite [Kouloughli, 2007] | 69 |
| Fig. II.30 : Situation du gisement par rapport à l'unité de Mostaganem | 70 |
| Fig. II.31 : Vue générale du Gisement de M'Zila Mostaganem | 71 |
| Fig. II.32 : Résultats de l'essai de Frattin [Geryville et al. ,2011] | 76 |
| Fig. II.33 : Résultats de l'essai de chaux saturée [Geryville et al. ,2011] | 76 |
| Fig. II.34 : Indice d'activité de résistances de la bentonite brute (B) et calcinée à 800°C (B-C) [Geryville et al. ,2011] | 77 |
| Fig. II.35: Variation de l'indice d'activité en fonction de température de calcination [Mirza et al. ,2009] | 77 |
| Fig. II.36 : Variation de la résistance des mortiers en fonction de la teneur de la bentonite calcinée (150° C) [Mirza et al. ,2009] | 78 |
| Fig. II.37 : Variation de la résistance des mortiers en fonction de la teneur de la bentonite calcinée (150° C) et le temps [Mirza et al. ,2009] | 78 |
| Fig. II.38 : Variation de la L'ouvrabilité, la densité de béton en fonction de la teneur de la bentonite [Shazim et al. ,2012] | 79 |
| Fig. II.39 : Variation de la résistance des bétons en fonction de la teneur de la bentonite et le temps [Shazim et al. ,2012] | 79 |

Chapitre III : Matériaux et méthodes

| | |
|---|----|
| Fig. III.1: Programme expérimental | 84 |
| Fig. III.2 : Courbes granulométriques des granulats | 88 |
| Fig. III. 3 : Bentonite broyée et tamisée | 89 |
| Fig. III.4 : Bentonite calcinée | 89 |
| Fig. III.5 : Courbes granulométriques de bentonite calcinée et ciment. | 90 |
| Fig. III.6 : Géométrie expliquant la loi de Bragg par analogie à la réflexion | 91 |
| Fig. III.7 : Schéma d'un diffractomètre | 91 |

| | |
|---|-----|
| Fig. III.8 : DRX pour la bentonite naturelle | 92 |
| Fig. III.9 : DRX pour la bentonite calcinée | 93 |
| Fig. III.10 : Superplastifiant SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 | 94 |
| Fig. III.11 : Appareil de Vicat | 97 |
| Fig. III.12 : Appareil de Vicat Automatique pour la détermination des temps de prise | 98 |
| Fig. III.13 : Moule pour éprouvettes de mortiers | 100 |
| Fig. III.14 : Table de Choc | 100 |
| Fig. III.15 : Eprouvettes des mortiers confectionnées | 100 |
| Fig. III.16 : Chambres d'humidité | 100 |
| Fig. III.17 : Appareil essai de flexion et compression | 101 |
| Fig. III.18 : Dispositif de flexion par trois points | 101 |
| Fig. III.19 : Dispositif de compression | 102 |
| Fig. III.20 : Malaxeur | 104 |
| Fig. III.21 : Essai d'étalement | 107 |
| Fig. III.22 : Essai de boîte en L | 107 |
| Fig. III.23 : Essai de stabilité au tamis | 109 |
| Fig. III.24 : Essai de J-Ring | 110 |
| Fig. III.26 : Confection des éprouvettes cylindriques en béton autoplaçant | 110 |
| Fig. III.27 : Presse des éprouvettes du béton | 111 |
| Fig. III.28 : Les éprouvettes conservées dans l'eau saturée en chaux | 111 |
| Fig. III.29 : Attaque acide HCL | 112 |
| Fig. III.30 : Attaque acide H ₂ SO ₄ | 112 |
| Fig. III.31 : Eprouvettes de béton immergé dans les attaques acides | 112 |
| Fig. III.32 : Pesée des éprouvettes | 113 |
| Fig. III.33 : Attaque sulfate de sodium (Na ₂ SO ₄) | 113 |
| Fig. III.34 : Eprouvettes de bétons immergés dans les solutions sulfatiques | 114 |
| Fig. III.35 : Eprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7x 28 cm ³) équipées de plots | 115 |
| Fig. III.36 : Mesure du retrait | 116 |

Chapitre IV : Résultats et discussions

| | |
|---|-----|
| Fig. IV.1 : Surfaces spécifiques Blaine en fonction du pourcentage de la bentonite calcinée | 119 |
| Fig. IV.2 : Variation du pourcentage de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ et CaO en fonction de la teneur de la bentonite calcinée | 120 |
| Fig. IV.3 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur la consistance | 121 |
| Fig. IV.4 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur le temps de prise | 121 |
| Fig. IV.5 : Résistances à la traction des mortiers à différents âges et la teneur en bentonite calcinée | 123 |
| Fig. IV.6 : Résistances à la compression des mortiers à différents âges et la teneur en bentonite calcinée | 124 |
| Fig. IV.7 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur l'indice d'activité de mélange | 127 |
| Fig. IV.8 : Etalement au cône d'Abrams | 128 |
| Fig. IV.9 : Résultats d'étalements des BAP | 129 |
| Fig. IV.10 : Boite en L | 130 |
| Fig. IV.11 : Résultats d'étalements des BAP | 130 |

| | |
|--|-----|
| Fig. IV.12 : Stabilité au tamis | 131 |
| Fig. IV.13 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis des BAP | 131 |
| Fig. IV.14 : Essai de J-Ring | 132 |
| Fig. IV.15 : Résultats de l'essai de J-Ring des BAP | 132 |
| Fig. IV.16 : Résistance à la compression de différents bétons autoplaçants | 134 |
| Fig. IV.17 : Evolution de la perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 2% H_2SO_4 | 136 |
| Fig. IV.18 : Dégradation des échantillons du béton après 2, 4 et 8 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique | 137 |
| Fig. IV.19 : Etat des éprouvettes de bétons immergés dans les attaques acides H_2SO_4 | 138 |
| Fig. IV.20 : Perte de masse des bétons autoplaçants immergés dans la solution HCL | 139 |
| Fig. IV.21 : Dégradation des échantillons du béton après 2 et 4 semaines d'immersion dans la solution d'acide chlorhydrique | 140 |
| Fig. IV.22 : Etat des éprouvettes de bétons immergés dans les attaques acides HCL | 141 |
| Fig. IV.23 : Variation de la masse des échantillons immergés dans les attaques acide (HCL – H_2SO_4) | 141 |
| Fig. IV.24 : Perte de masse des bétons autoplaçants immergés dans la solution Na_2SO_4 | 142 |
| Fig. IV.25 : Evolution des résistances à la compression des BAP immergés dans la solution sulfatique (Na_2SO_4) | 143 |
| Fig. IV.26 : Etats des surfaces des éprouvettes des BAP immergées dans Na_2SO_4 | 144 |
| Fig. IV.27 : Carbonatation naturelle à 13 mois | 144 |
| Fig. IV.28 : Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 13 mois à l'air libre de laboratoire | 145 |
| Fig. IV.29 : Retrait total des bétons autoplaçants | 147 |
| Fig. IV.30 : Retrait endogène des bétons autoplaçants | 148 |
| Fig. IV.31 : Retrait de dessiccation des bétons autoplaçants | 149 |

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur le béton autoplaçant et la durabilité

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Propriétés essentielles des bétons autoplaçants à l'état frais [KHAYAT 1999] | 18 |
|--|----|

Chapitre II : Les ajouts minéraux et la bentonite

| | |
|---|----|
| Tableau II.1 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [AICHOUBA, 2005] | 49 |
|---|----|

Chapitre III : Matériaux et méthodes

| | |
|---|-----|
| Tableau III.1: Composition chimique du ciment utilisé | 85 |
| Tableau III.2 : Compositions minéralogique de clinker | 86 |
| Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5 | 86 |
| Tableau III.4 : Caractéristiques physiques de graviers (3/8)-(8/15) | 87 |
| Tableau III.5: Analyse chimique gravier 3/8 et 8/15 | 87 |
| Tableau III.6 : Caractéristiques physiques de sable de carrière, Sable de mer | 87 |
| Tableau III.7: Analyse chimique de sable de carrière, Sable de mer | 88 |
| Tableau III.8 : Composition chimique du ciment du bentonite calcinée et naturelle | 93 |
| Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du bentonite calcinée | 93 |
| Tableau III.6 : Caractéristiques du Superplastifiant SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 | 94 |
| Tableau III.7 : Compositions des mortiers | 98 |
| Tableau III.8 : Compositions des mélanges | 103 |

Chapitre IV : Résultats et discussions

| | |
|---|-----|
| Tableau IV.1 : Surfaces spécifiques Blaine des différents mélanges | 119 |
| Tableau IV.2 : Composition chimique des matériaux utilisés | 119 |
| Tableau IV.3 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur le temps de prise et la consistance | 121 |
| Tableau IV.4 : Résistances à la traction des mortiers à différents âges | 122 |
| Tableau IV.5 : Résistances à la compression des mortiers à différents âges | 124 |
| Tableau IV.6 : Indice d'activité des différents mélanges à 07, 28 jours et 90 jours | 126 |
| Tableau IV.7 : Résultats d'étalements des BAP | 128 |
| Tableau IV.8 : Résultats de la boîte en L des BAP | 130 |
| Tableau IV.9 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis des BAP | 131 |
| Tableau IV.10 : Résultats de l'essai de J-Ring des BAP | 132 |
| Tableau IV.11: Masses vomiques des BAP | 133 |

Résumé

La construction en générale est grande consommatrice de matières premières à base de ciment. Ces produits posent trois problèmes principaux :

1. leur impact environnemental vis-à-vis notamment des fortes libérations de CO₂ lors de la fabrication du ciment ainsi que les gaz à effet de serre.
2. la difficulté technique à mettre en place ces produits qui, de par leur faible plasticité et leur instabilité, imposent des formulations peu optimisées par rapport au besoin réel de l'ouvrage final.
3. leur prix de revient dans un contexte de forte croissance du coût énergétique qui impacte celui du ciment.

Face à ce constat, la perspective de substitution partielle du ciment par la bentonite (argile naturelle de type montmorillonite) après calcination est une solution prometteuse qui procure les propriétés plastiques manquantes au ciment tout en participant aux réactions de durcissement nécessaires à l'obtention de la résistance requise. De plus, la production de la bentonite produit moins de CO₂, ce qui est en fait un produit intéressant d'un point de vue environnemental.

Cette étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la bentonite de M'zila, Wilaya de Mostaganem (Ouest Algérien) après calcination en substitution partielle au ciment en tant que pouzzolane artificielle. L'influence de cet ajout sur les mortiers et sur les bétons autoplaçants a été étudiée. La bentonite a subi une calcination pour la rendre active puis incorporée en dosages définis substituables au ciment (0, 5, 10, 15, 20 et 25 % de bentonite calcinée par rapport au dosage en masse du ciment). Des bétons autoplaçants (BAP) ont également été formulés avec différents pourcentages de substitution de bentonite calcinée (0%, 10%, 20%, et 30%). Ces derniers ont été caractérisés par des essais spécifiques à l'état frais, tels que : l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai à la boîte en L, l'essai de stabilité au tamis et à l'état durci par l'essai de la résistance à la compression.

Aussi, ces bétons ont été soumis à des essais de durabilité (Attaques acides et sulfatiques et retrait).

Les bétons obtenus ont été de qualités très satisfaisantes tant sur les résistances mécaniques à la compression que sur leur durabilité et tout particulièrement pour le BAP à 10% d'ajout de bentonite calcinée.

Mots clés : Bentonite, valorisation, ciment, résistance mécanique, mortier, béton autoplaçant, durabilité.

Abstract

The construction in general is a major consumer of the raw materials to a cement base. These products pose three main problems:

1. Their environmental impact resulting strong releases of CO₂ during the manufacture of cement as well as the greenhouse gases.
2. The technical difficulty to put in place the products that, by their low plasticity and their instability, impose formulations less optimized with respects to the real need of the final work.
3. Their cost price in a context of strong growth of the energy cost which affects that of the cement.

In the face of this, the prospect of partial substitution of cement by bentonite (natural clay of montmorillonite type) after calcination is a promising solution that has the plastic properties missing at the cement while participating in the reactions of hardening needed to obtain the required resistance. In addition, the production of the bentonite produces less CO₂, which is in fact an interesting product from an environmental point of view.

This study aims to contribute to the enhancement of the bentonite of M'Zila, (county of Mostaganem, west of Algeria) after calcination in partial substitution of the cement as artificial pozzolana. This work shows the influence of this adding on mortars and self-compacting concretes (SCC). The bentonite has been calcined to become active and added with defined proportions to cement (0, 5, 10, 15, 20, and 25% of cement weight). The self-compacting concretes (SCC) have likewise formulated with different proportions of calcined bentonite (0, 10, 20 and 30%).

The SCC formulated with different percentages of calcined bentonite are characterized by specific tests in the fresh state, such as the slump test with the cone of Abrams, the L-box test, the sieve stability test and in the hardened state by the test of the resistance to compression. The self-compacting concretes produced have proved to be very satisfactory in their mechanical resistance and in their durability, particularly for the percentage of 10% of adding calcined bentonite.

Key words: Bentonite, valorization, cement, mechanical resistance, mortar, self-compacting concrete, durability.

الملخص

بصفة عامة المنشآت هي أكثر استهلاكاً للمواد الأولية وخاصة الإسمنت كما أن هذه المادة أصبحت تشكل ثلاثة أخطار أساسية :

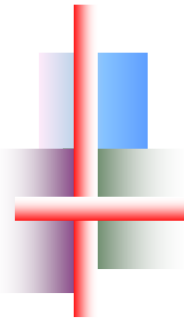
1. أثر على المحيط والمتمثل في انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون والنتيجة عن صناعة الإسمنت.
2. الصعوبة التقنية في إعداد هذه المواد نظراً لضعف مرونتها وعدم ثباتها مما يشكل خليط ناقص نوعاً ما مقارنة بالاحتياجات الحقيقية لإنجاز النهائي المشروع.
3. السعر المرجعي يزداد بقوة نتيجة ازدياد الطاقة مما يؤدي إلى التأثير على الإسمنت.

نظراً إلى هذه الحالة نأمل في تعويض جزء من الإسمنت بالبتونيت (طين طبيعي) بعد الحرق وهو الحل الذي يبعث إلى التفاؤل و يضمن خصائص المرونة الموجودة في الإسمنت والتي تشارك في التفاعلات التصلب اللازمة من أجل الحصول على مقاومة عالية. إضافة إلى ذلك إنتاج البتونيت يقلل من انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون فهي مادة مهمة بالنسبة للمحيط و البيئة.

هذه الدراسة موجهة إلى استخدام البتونيت المتواجد بمنطقة مزيلة ولاية مستغانم المتواجدة بالغرب الجزائري وذلك بعد عملية الحرق كمادة جزئية في الإسمنت كبوزلان صناعي . كما تمت دراسة تأثير هذه الإضافة على الملاط وفقاً لمقادير مدروسة (0-5-10-15-20-25٪) من وزن الإسمنت وتعويضه بجزء من البتونيت الذي تم حرقه. أربعة أنواع من الخرسانة ذاتية القوية تم إعدادها بمختلف النسب المؤوية للبتونيت وهي (0-10-20-30٪) هذه الأخيرة أجريت عليها تجارب خاصة في الحالة السائلة وفي الحالة الصلبة.

كذلك هذه الخرسانات خضعت لتجارب الديمومة (هجمات الكبريتات والأحماض والتقلص). الخرسانات المحصل عليها ذات نتائج مرضية سواء بالنسبة لمقاومة الضغط أو الديمومة خاصة بالنسبة للخرسانة ذاتية القوية ذات إضافة 10٪ بالنسبة للبتونيت المحروق.

الكلمات الرئيسية: البتونيت-استخدام-الإسمنت-المقاومة الميكانيكية-الملاط-الخرسانة ذاتية القوية-ديمومة



Introduction générale

La politique de l'autorité algérienne surtout dans les dernières années était basée sur le développement de l'investissement dans l'industrie dans tous les domaines exceptionnellement dans l'industrie cimentaire d'une part. D'autre part, le ciment est l'un des matériaux le plus consommé dans le monde. Le secteur de la construction, à travers l'utilisation massive de béton, est responsable de 5 à 10 % des émissions globales de dioxyde de carbone. L'idée de béton vert et durable est de produire des matériaux plus respectueux de l'environnement à travers l'utilisation des ressources locales en tant que granulats ou en tant qu'ajouts cimentaires. Ainsi, un certain nombre de sous-produits sont susceptibles d'être ajoutés dans les bétons. C'est notamment le cas des argiles calcinées. Pour cela, il faut lancer des recherches on prendre par considération les matières premières locaux dans toute les régions pour assurer le développement durable.

Pour assurer le développement durable divers travaux ont été réalisés sur des matériaux tels que les sédiments de dragage et les argiles vaseuses et gréseuses, utilisés comme éléments substituables au ciment pour la confection des matériaux cimentaires. Ces études ont concerné des argiles de différentes provenances (argile gréseuse du barrage de Ksob dans l'est Algérien, sédiments de dragage de Oued Fedda dans le centre Algérien et la vase du barrage de Fergoug se trouvant dans l'ouest). Ces travaux ont confirmé la possibilité d'utiliser ces ajouts en tant que substituts partiels au ciment afin d'obtenir des mortiers et des bétons de bonnes qualités rhéologiques et mécaniques. Toutefois, le potentiel de substitution du ciment reste limité de par la faible disponibilité des pouzzolanes (substituants) par rapport au volume de ciment à l'échelle mondiale. Dans les pays en voie de développement, cette carence en substituants est encore accentuée par le manque d'additifs minéraux artificiels issus des processus industriels. Seulement les travaux de recherche sur la bentonite en tant que substitut partiel au ciment sont rarement effectués en Algérie. C'est pourquoi notre intérêt s'est porté sur ce matériau se trouvant à proximité de Mostaganem pour le valoriser dans les matériaux cimentaires. Un programme expérimental s'inscrit dans cette problématique et cherche à répondre aux questions posées par cette dernière à savoir : comment fournir un béton résistant et durable avec un faible impact environnemental tout en utilisant les ressources locales. En d'autres

termes, est-il possible de développer localement de nouvelles additions minérales pour le ciment ?

Par ailleurs, la technologie des bétons autoplacants est capable de consommer d'énormes quantités de ces argiles comme substitution partielle dans le ciment, qui à son tour pourrait apporter et/ou améliorer les caractéristiques et les performances de ce type de bétons. Les avantages du remplacement partiel du ciment par des matériaux pouzzolaniques sont divers : le renforcement de la résistance aux attaques chimiques, l'amélioration de l'imperméabilité et de la durabilité, la réduction des réactions alcalines avec les agrégats. C'est pourquoi cette recherche a été engagée pour élaborer une pouzzolane artificielle à partir de la bentonite (l'argile de type montmorillonite). Ce matériau qui peut améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux cimentés grâce à leur finesse et à leur forte teneur en silice et alumine. La finesse de la bentonite permet à l'argile d'apporter l'effet des fillers aux mortiers et bétons en réduisant les pores et en renforçant leur structure. L'utilisation de la bentonite en substitution partielle au ciment a montré une meilleure performance mécanique et résistance aux attaques acides comparativement à celle du béton témoin sans ajout. Cette argile étant faiblement active a donc été activée par traitement thermique qui lui confère une certaine activité pouzzolanique et qui lui permet de réagir facilement avec l'hydroxyde de calcium résultant de l'hydratation du ciment, en formant plus de C-S-H et/ou C-A-H responsables du développement des résistances mécaniques du liant.

Cette étude a pour but d'utiliser la bentonite calcinée comme substitution partielle au ciment pour obtenir un ciment composé et pour confectionner des mortiers à 5, 10, 15, 20 et 25% et des bétons autoplacants à 10, 20 et 30 % de bentonite calcinée. Un béton témoin sans ajout a été élaboré en guise de comparaison.

Les mortiers et les bétons ainsi confectionnés ont été testés vis-à-vis du comportement mécanique et la durabilité. Les résultats obtenus montrent de bonnes perspectives pour ces matériaux cimentaires à base de bentonite qui affichent des performances mécaniques très satisfaisantes.

Le travail de recherche réalisé dans ce mémoire de thèse est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une généralité sur le béton autoplacant, les méthodes élaborées pour sa formulation et les différentes techniques permettant sa caractérisation. Aussi, il est montré quelques aspects affectant la durabilité de béton autoplacant tels que, l'action des sulfates, des acides, la corrosion des armatures et le retrait.
- Dans le deuxième chapitre, il est présenté, les différents ajouts minéraux et leur intérêt d'utilisation dans le domaine du génie civil. Il est inclu en particulier la bentonite en présentant la définition, les gisements, leurs utilisations, l'influence de la bentonite sur les

performances mécaniques, sur les attaques sulfates et acides des matériaux du ciment et le béton.

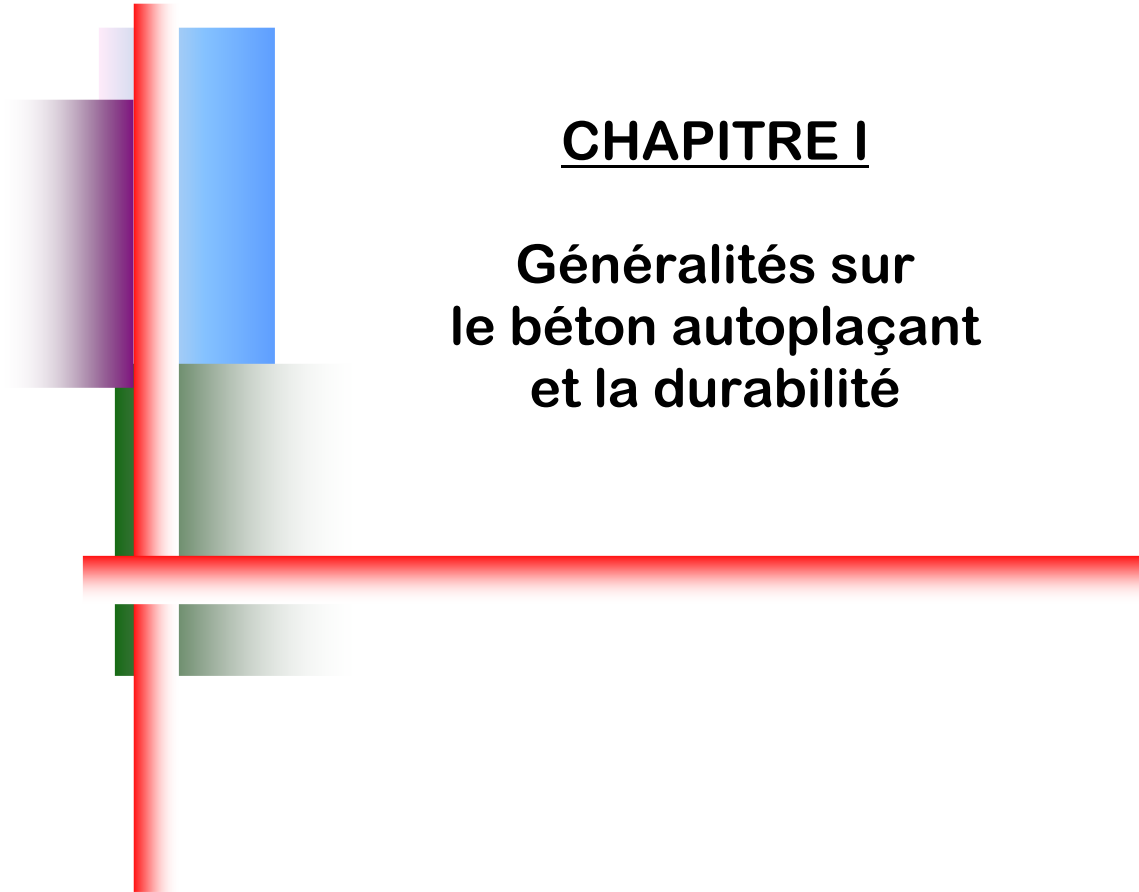
- Le troisième chapitre traite de l'ensemble des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents mortiers et des bétons autoplaçants. Il est donné les différents résultats des essais d'identification et de caractérisation.

- Le quatrième chapitre concerne les résultats des essais mécaniques, les essais de durabilité tels que : les attaques acides ($\text{HCl} - \text{H}_2\text{SO}_4$) et l'attaque sulfatique (Na_2SO_4) ainsi que les essais de retrait effectués sur les différents mortiers et bétons autoplaçants.

- Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives pour de futurs travaux de recherche.

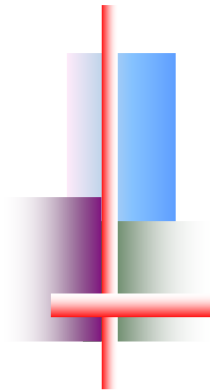
PARTIE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I

Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité



Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité

1. LE BETON AUTOPLAÇANT

1.1 Introduction

Depuis son apparition, le béton autoplaçant a fait l'objet de plusieurs recherches. Des chercheurs du monde entier se sont penchés sur le problème de formulation des bétons auto-plaçants, et plusieurs méthodes ont été développées.

Nous nous proposons, de présenter dans la première partie de ce chapitre une généralité sur le béton auto-plaçant sur son historique et sur quelques méthodes de sa formulation.

1.2 Historique du béton auto-plaçant

L'idée de béton auto-plaçant a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure.

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent deux intérêts technico-commerciaux :

- Facilité de mise en place : diminution du temps de réalisation, diminution du personnel donc du coût de la main-d'œuvre ; ainsi que la possibilité d'utiliser des coffrages de complexes et de forte densité d'armatures.
- Amélioration de la qualité du béton (résistance et durabilité), qui est indépendante du savoir-faire des ouvriers.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) s'est penché sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle ont été réalisées au début de

1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferrillées. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication.

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacrées. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans.

Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles. [Sedran ,1995 ; Braquenier et al., 2000 ; CSTC 2004].

1.3. Spécification de la composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

1.3.1 Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

1.3.2 Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler

calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (Fig. I.1) [Billberg, 2001].

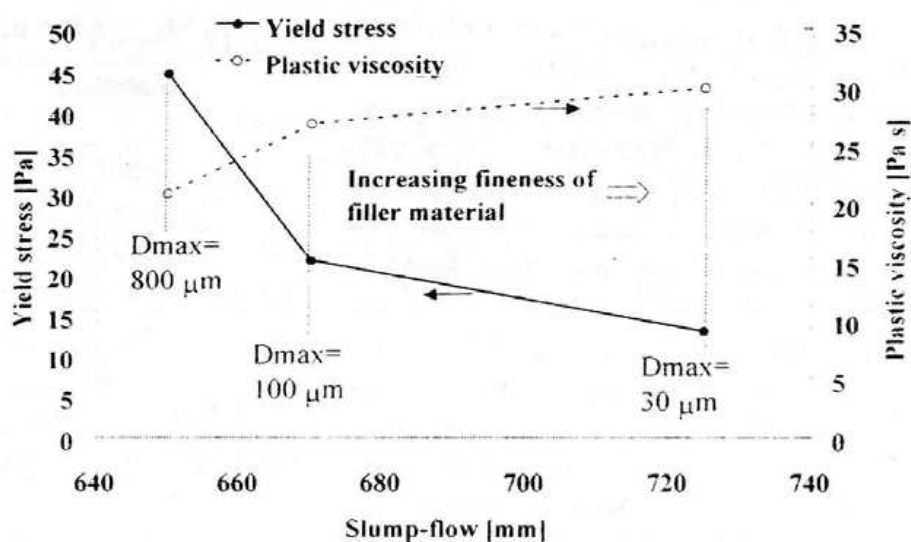


Fig. I. 1 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg, 2001]

1.3.3 L'emploi de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [Baron et Ollivier, 1996].

1.3.4 L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité

souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (Fig. I.2). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

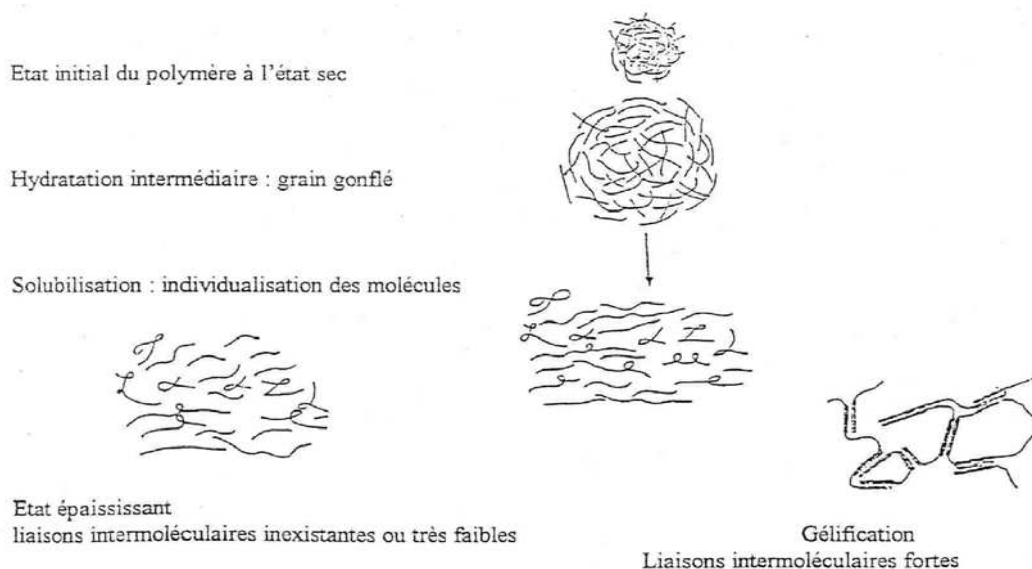


Fig. I.2 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides d'après [Hasni ,1999]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (Fig. I.3)

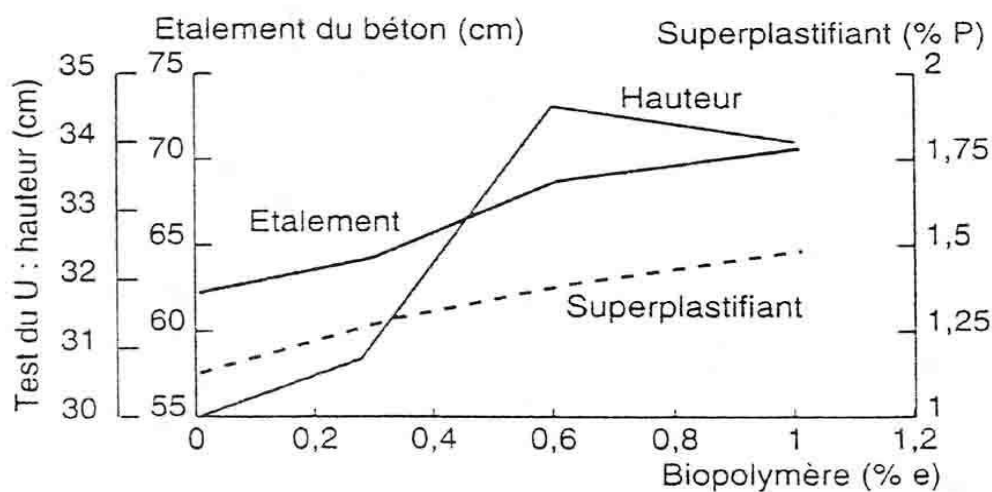


Fig. I.3 : Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, d'après [Tangtermsirikuls ,1991]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines $< 0,3$). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas. Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran ,1995].

1.3.5 Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés, donc il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{max} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

1.4 Le béton autoplaçant et le béton ordinaire

Le béton autoplaçant se distingue principalement du béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais. En effet, le béton autoplaçant est un béton fluide et parfaitement homogène qui se met en place sans vibration. Il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu et reste homogène au cours l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique).

Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation, et sa stabilité, ce béton garantit des structures résistantes et durables.

Pour obtenir un béton fluide il ne s'agit pas d'ajouter de l'eau, au contraire, une telle manipulation conduite à des phénomènes de ségrégation entraînant une chute des performances. Il s'agit de trouver la composition optimale entre les différents constituants

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité

(gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), et de garantir l'absence de ségrégation et de ressuage.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires. Ils comportent un fort dosage en sable, en ciment et en éléments fins, ainsi que des ajouts chimiques et minéraux qui permettent de modifier leurs propriétés. Les granulats utilisés doivent être de diamètre limité pour prévenir la formation des voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. [Turcry et al. ,2003 ; Turcry, 2004, Holcim ,2005].

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton ordinaire mais leurs proportions sont différentes (Fig. I.4). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

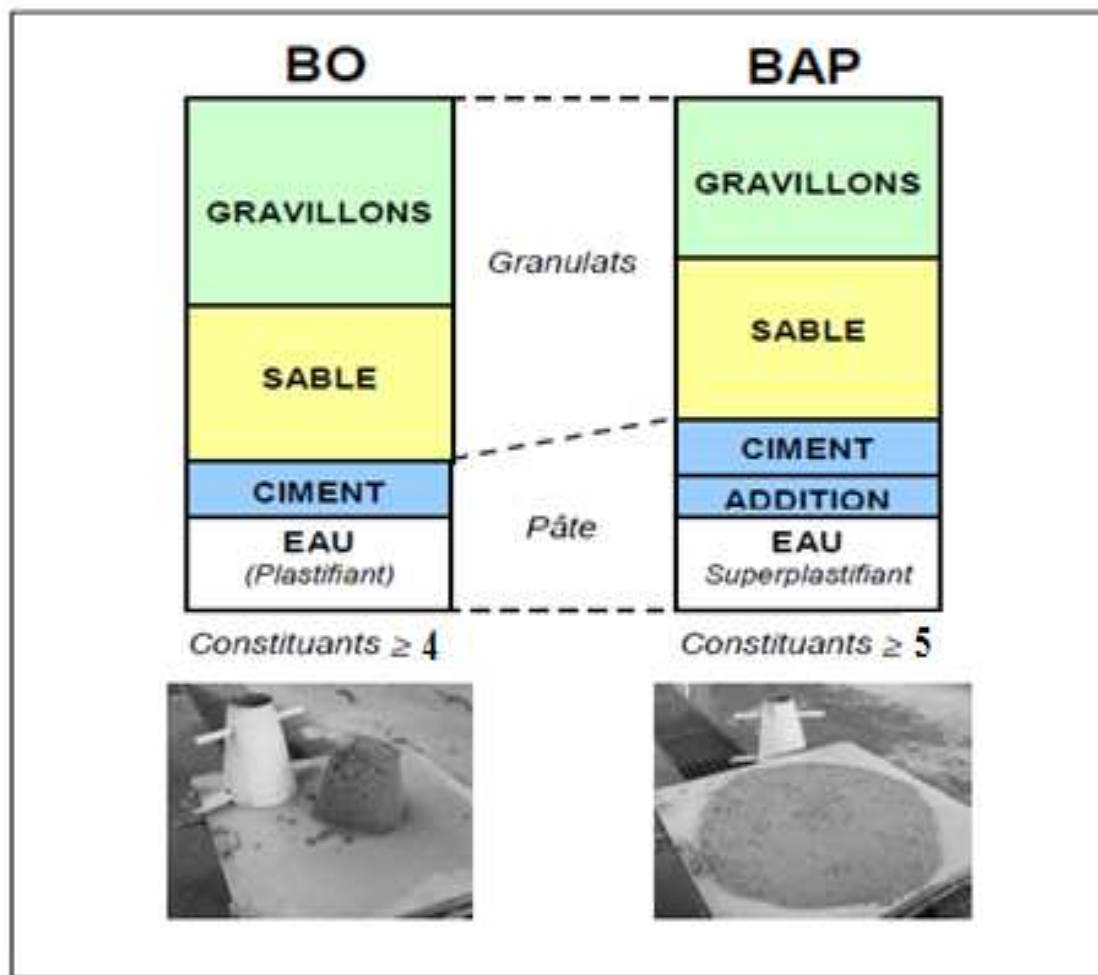


Fig. I.4 : Aspect à l'état frais d'un béton ordinaire plastique et d'un béton auoplaçant [Turcry ,2004]

1.5 Les avantages d'utilisation du béton autoplaçant

Les avantages du béton autoplaçant sont :

1.5.1 La mise en œuvre

- Diminution du temps de coulée.
- Suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages.
- Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes ».
- Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles.
- Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.

1.5.2 La qualité du béton

- Parfait remplissage des éléments fortement ferrailés (Fig. I.5).
- Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

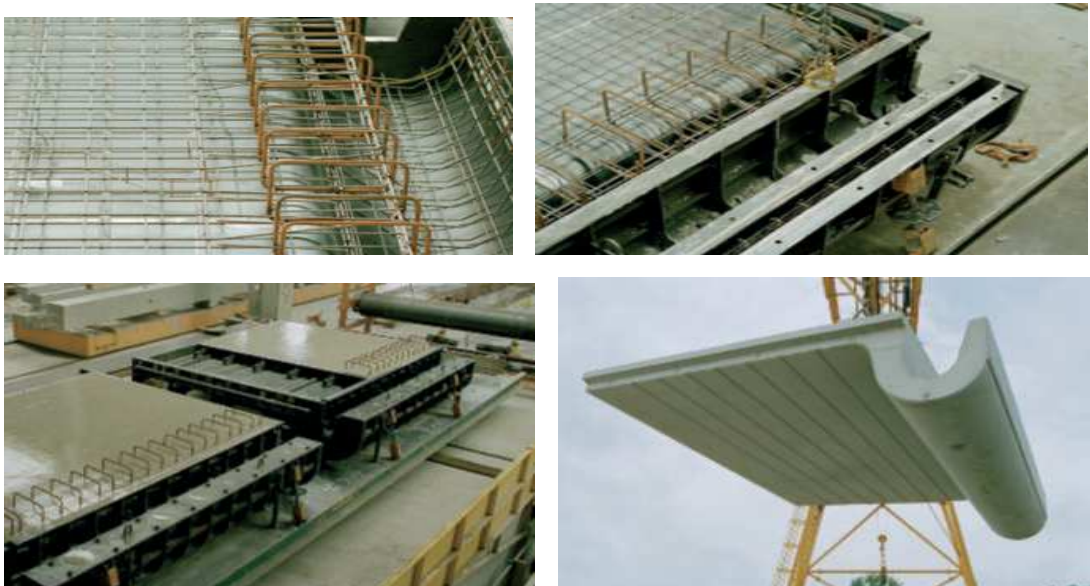


Fig. I.5 : Application du BAP dans la préfabrication [FEBELCEM, 2005].

1.5.3 La conception

- Permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton.
- Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage (Fig. I.6).



Fig. I.6 : Bâtiment industriel complexe, réalisé en BAP coulé sur chantier [FEBELCEM, 2005]

Le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées. En effet, les données de la littérature concernant les pressions exercées par les BAP sont parfois contradictoires mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais.

Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre, de l'usure moindre des coffrages et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées.

1.6 Formulation d'un béton autoplaçant

1.6.1 Principes de formulation

Les deux principales propriétés recherchées des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire car l'obtention de l'une se fait au détriment de l'autre.

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau, en effet le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques tel que : une résistance plus élevée, fluage et retrait plus faibles, et une durabilité accrue.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations des bétons autoplaçants. L'objectif principal de ces recherches a pour objectif l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci. [HOLCIM, 2005].

1.6.2 Méthodes de formulation des bétons autoplaçants

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première [Okamura et al., 1995] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Peterson et al., 1996]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

1.6.3 Différentes méthodes de formulation

1.6.3.1 Méthode Japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

- Dosage des gravillons

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

- Dosage du sable

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

- Dosage du liant

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eaux sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

- Dosage de l'eau et du superplastifiant

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

1.6.3.2 Méthode Suédoise: [Petersson et al., 1996]

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al., 1995].

En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

1.6.3.3 Méthode Française (LCPC)

Proposée par [De Larrard et al., 1994]: au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante:

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé.
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à $5 \cdot 10^4$ La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats sur phase liante sont optimisées. Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

1.6.3.4 Autres Méthodes

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de l'excès

de pâte » : proposée par Oh et al., 1999 ; la méthode d'évaluation simple utilisée par Ouchi et al, 1999 (étude l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc.

1.6.4 Les propriétés essentielles recherchées

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui même, un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité). [Menai, 1995].

La compacité du béton est une propriété recherchée pour avoir une matrice homogène, afin de favoriser l'amélioration des qualités mécaniques et de la durabilité du béton durci. Les chercheurs visent aussi à aboutir à la stabilité des bétons autoplaçants, en proposant différentes solutions (utilisation des agents colloïdaux et des superplastifiants), car en général le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à assurer. [Menai, 1995]

Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage.

Aussi, lors de sa mise en place les BAP ne doivent pas présenter des phénomènes de blocage (encombrement des granulats aux alentours des zones ferraiées).

Un BAP est donc, un béton qui est capable de remplir les coffrages les plus complexes (de part leurs formes) et les plus ferraiées (densité d'armatures considérable) sans avoir recours à d'autres moyens de mise en place que l'effet du poids propre du béton même. Ce béton ne doit en aucun cas présenter de ségrégation ni de blocage de l'écoulement.

Selon [Khayat, 1999] les propriétés essentielles des BAP frais sont :

- Une excellente fluidité (an Excellent deformability)
- Une bonne stabilité (a good sability)
- Un risque minime de blocage (à low risque of blockage)

En pratique, il est de première importance de s'assurer que le béton possède effectivement les qualités qu'on lui prête. Pour cela, il existe de nombreux essais empiriques et rhéologiques permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

Ces propriétés peuvent être obtenues par le jeu de paramètres représenté dans le Tableau I.1 :

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité

Tableau I.1 : Propriétés essentielles des bétons autoplaçants à l'état frais [Khayat, 1999]

| | |
|--|---|
| Pour une excellence déformabilité | <ul style="list-style-type: none">1- L'augmentation de la fluidité de la pâte<ul style="list-style-type: none">a- Par l'utilisation de super plastifiants hauts réducteurs d'eau.b- Par l'adoption d'un optimal rapport eau /liant.2- La réduction des frictions inter granulaires<ul style="list-style-type: none">a- En diminuant le volume de gros granulats (un volume de pâte élevé).b- En utilisons un liant de granularité continue. |
| Pour une bonne stabilité | <ul style="list-style-type: none">1- La réduction des séparations des particules solides<ul style="list-style-type: none">a- Par limitation de la teneur des granulats.b- Par la réduction du diamètre maximal des granulats.c- Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité :<ul style="list-style-type: none">- Un petit rapport eau /liant- L'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité)2- La minimalisation du ressuage<ul style="list-style-type: none">a- En adoptant un petit dosage en eau.b- En adoptant un petit rapport eau /liant.c- En utilisant des fines à grande surface spécifique et en augmentent le dosage en agent de viscosité. |
| Pour un moindre risque de blocage | <ul style="list-style-type: none">1- Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats<ul style="list-style-type: none">a- Par l'adoption d'un petit rapport eau /liant.b- Par l'utilisation d'agent colloïdal.2- Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et le diamètre maximal) :<ul style="list-style-type: none">a- Par l'utilisation d'un petit volume de granulats.b- En choisissant un petit diamètre maximal des granulats. |

1.6.5 Les essais de caractérisation des bétons autoplaçants

Pour évaluer la fluidité, plusieurs essais normalisés et non normalisés sont recommandés. Ces essais ne mettant pas en relief l'importance du caractère homogène du béton, il est donc avéré

nécessaire de développer une autre famille d'essais ; les tests de facilité et capacité de remplissage.

La facilité ou capacité de remplissage de BAP est définie comme l'aptitude du béton à rester homogène et remplir entièrement tous les coins du coffrage sans aucune vibration. [Shindoh et al., 2003].

En ce qui concerne l'aptitude au remplissage, les travaux sur les BAP utilisent des tests non normalisés. En fait, pratiquement tous les laboratoires ont bricolé leur propre montage, ce qui complique grandement l'analyse des résultats de la littérature [Menai, 1995].

Les essais visant à évaluer la capacité de remplissage ont généralement comme principe d'évaluer l'habileté du béton à passer à travers une série de barres d'armature en mesurant la quantité de béton ayant franchi ces obstacles.

Les méthodes de mesure de la ségrégation se présentent en deux groupes : le premier comprend les méthodes de mesure sur béton frais, alors que le second concerne les méthodes de mesure sur béton durci. Jusqu'à présent, aucune méthode ne fait l'unanimité.

Il est présenté ci-dessous les différents types d'essais qui sont réalisés pour la caractérisation des BAP tout en sachant qu'ils en existent d'autres non mentionnés dans ce chapitre.

1.6.5.1 Essai d'étalement

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Fig. I.7). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. Selon Nagataki et Fujiwara une valeur de l'étalement comprise entre 500 et 700 mm suffit au béton pour être autoplaçant. Pour un étalement supérieur à 700 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 500 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées. [Lachemi et al., 2004 ; Nagataki et al., 1995]. C'est une mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP cette valeur est généralement, comprise entre 4 et 10 secondes. [Lachemi et al., 2004 ; Nagatak et al., 1995].

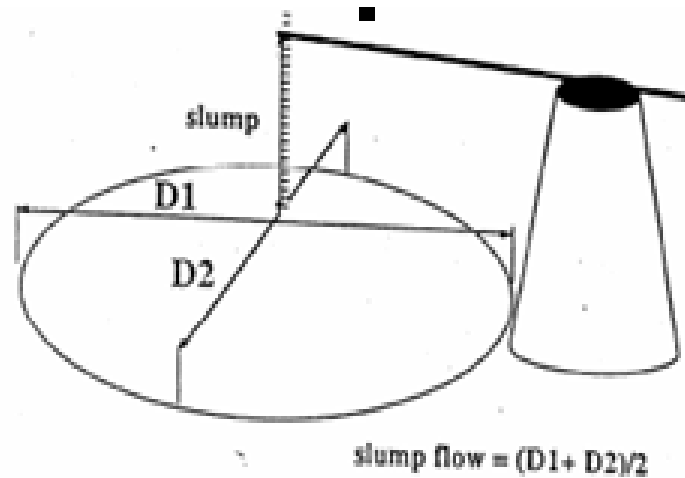


Fig. I.7 : Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement du béton autoplaçant

1.6.5.2 Essai de la boîte en L

Il s'agit d'un coffrage en forme de « L » ayant les dimensions de 4000 x 2000 x L_f mm ; L_f étant la longueur sur laquelle se fait l'étalement qui peut être variable [Lachem et al. ,2004].



Fig. I.8 : Essai de la boîte en L

Cette boîte a les dimensions (1000 x 200 x 1500 mm³). On remplit la partie verticale du coffrage avec du béton, puis une porte de séparation est ouverte et le béton coule dans le compartiment horizontal. On note le temps mis par le béton jusqu'à ce que l'étalement cesse et on détermine alors la vitesse et la distance de l'écoulement qui est des indices de la fluidité du béton.

1.6.5.3 Essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »

Cet essai consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V » (Fig. I.9) le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. D'après Khayat, 1999 et Manai, 1995, un temps d'écoulement à l'entonnoir en forme de « V » inférieur à 6 secondes est recommandé pour pouvoir qualifier le béton d'autoplaçant. Cet essai est utilisé aussi pour évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Moins le béton est stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions inter-granulaires et plus la durée de l'écoulement est longue [Bouzoubaa et al. ,1999 ; Bouzoubaa et al. 2001].

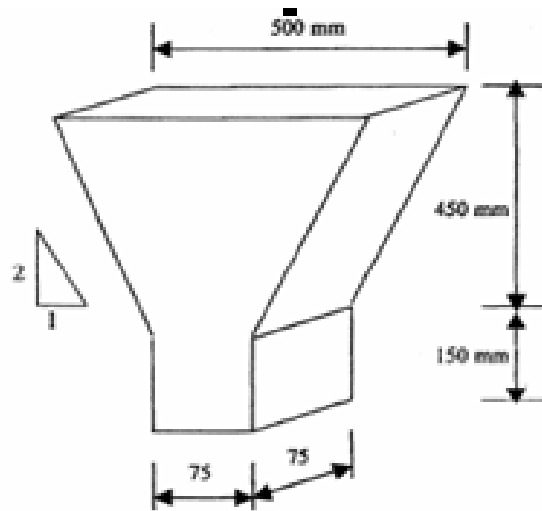


Fig. I.9 : Essai de l'entonnoir en forme de V

1.6.5.4 Essai de stabilité au tamis

Cette méthode consiste à déposer deux (02) litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture (Fig. I.10). Après cinq minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2 litres, donne l'indice de ségrégation.

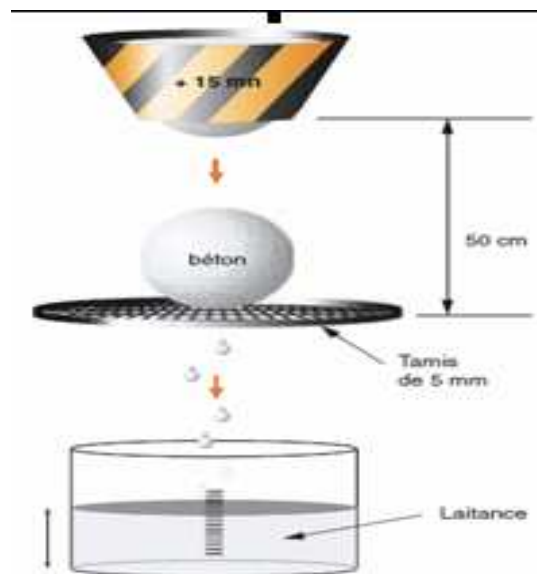


Fig. I.10 : Essai de la stabilité au tamis

1.6.5.5 Essai J-Ring

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique (Fig. I.11). On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

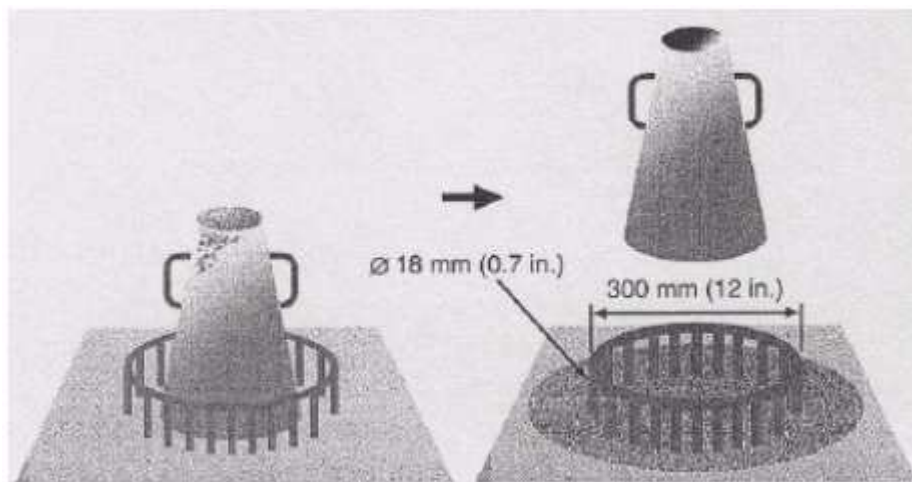


Fig. I.11: Essai J. Ring

1.7 Conclusion

La littérature nous a permis de se familiariser avec le BAP qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics. Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton. Dans cette partie de ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique documentée, passant en revue les différentes méthodes de formulation du béton autoplaçant et les essais de caractérisation des BAP, essentiellement à l'état frais, en mettant l'accent sur le travail qui a été fait au niveau européen ce qui a constitué le Guide Européen pour les BAP.

2. LA DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT

2.1 Introduction

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique et sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant et la durabilité

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

Les ouvrages en béton disposent aujourd'hui d'un support normatif complet, constitué de normes européennes et de référentiels français. Cet ensemble de textes couvre :

- Le dimensionnement des ouvrages en béton.
- Les constituants du béton : la norme NF EN 197-1 pour les ciments, les normes NF EN 12620 et XP P18-545 pour les granulats et la norme NF EN 934-2 pour les adjuvants.
- La durabilité des bétons : norme NF EN 206-1, fascicule de documentation FD P18-011, recommandations sur l'alcali réaction, le gel dégel, la réaction sulfatique interne.
- Les produits en béton : norme NF EN 13369.
- L'utilisation du béton dans les ouvrages : Fascicule 65A, DTU....

Ces normes et référentiels se complètent de manière cohérente et permettent in fine de mieux appréhender et de mieux maîtriser la durabilité des structures en béton [Rougeau et al., 2008 ; Capmas, 2008].

Malgré les aspects intéressants que proposent les bétons autoplaçants, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, ils ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, ce qui limite encore leur diffusion [Assie, 2004]. Pour encourager l'utilisation des bétons autoplaçants, plusieurs études sur les différents aspects de la durabilité des bétons autoplaçants comme la perméabilité à l'oxygène [Zhu et al., 2001 ; Zhu et al. ,2003], la diffusion des ions chlore [Tang et al. ,1999 ; Rougeau et al. ,1999 ; Audenaert et al. ,2003], la carbonatation accélérée [Aitein et al. 1998, Audenaert et al. ,2003], la lixiviation [Carde, 1997],..., ont été menées depuis quelques années.

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, qu'ils soient minéraux, organiques ou biologiques, sont d'ordre chimique ou physique.

Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients d'humidité ou de température, pression de cristallisation, exposition aux températures externes).

Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux [Merdia et al. ,2005] dont les conséquences sont d'ordre macroscopique :

- **Mécanique** : chute de résistances et de rigidité, fissuration et déformation du matériau.

- **Physico-chimique** : baisse du pH, augmentation de la porosité et des propriétés de transfert des gaz et des liquides.

L'action des ions sulfate issus du gypse, utilisé comme retardateur de prise, ne présente pas un danger pour les bétons car l'hydrate formé est certes expansif, mais cristallise dans une pâte de ciment fraîche et plastique qui supporte les déformations induites. Par contre en cas d'attaque externe après la prise, la cristallisation de l'hydrate se fait dans la porosité d'une matrice peu déformable. L'expansion de l'ettringite peut alors donner naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant expansion, fissuration voire éclatement du béton [Mather, 2000].

2.2 Durabilité et économie

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

Règle 1 : l'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.

Règle 2 : la communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif.

2.3 Béton durable et béton résistant

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la

résistance. Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc.

Serait-ce aussi le plus durable ?

Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. On peut traiter la question comme la durabilité du béton face au gel-dégel, à l'alcali-réaction, aux environnements agressifs. Une façon pratique d'y parvenir est de toujours partir de la résistance aux efforts de compression pris comme critère global et de discuter de la durabilité en deux temps :

- Toutes choses égales par ailleurs, en comparant des bétons qui ne diffèrent que par leur résistance.
- Puis à résistance constante, en examinant les paramètres spécifiques de la durabilité [Rissel Khelifa, 2009]

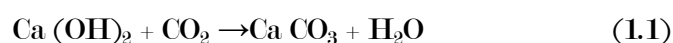
Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité, à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit être complété par d'autres conditions. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables. A résistance égale, il existe des différences parfois importantes, entre les bétons. Au simple critère de résistance, il faut ajouter d'autres considérations.

D'abord, la résistance (et ainsi la porosité) n'est qu'un critère de premier ordre qui doit être complété par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion, la distribution des tailles de pores. En effet, un autre facteur majeur est la dimension des pores. A porosité égale, les agents agressifs pénètrent d'autant plus difficilement que les pores sont fins. Or, la finesse des pores dépend du rapport E/C, du ciment (CHF-CEM III/A, CLC-CEM V/A et B, CLK-CEM III/C comparés au CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A), des additions minérales (cendres volantes, laitiers), de l'exposition du béton (dessiccation, carbonatation) et même de la dimension et de la nature des granulats [Mather, 2000].

2.3.1 La carbonatation

C'est une réaction entre le gaz carbonique (CO_2) existant soit en phase gazeuse, soit par suite de solubilité dans l'eau (eaux pluviales) avec la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérée lors de l'hydratation des silicates bicalciques (C_2S) et tricalciques (C_3S) pour former le carbonate du calcium (CaCO_3) appelé aussi calcite.



Cette réaction n'est pas en elle-même pathologique et doit être considérée comme une évolution normale du béton. Cependant, elle consomme peu à peu la réserve d'alcalinité du milieu assurée par la chaux, qui a un pH initial compris entre 12 et 13, et évolue vers la neutralité (pH 9). Conséquence, l'alcalinité n'est plus capable de maintenir la passivité du filme d'oxyde. Une telle situation augmente considérablement la vulnérabilité des armatures aux phénomènes de corrosion, en particulier si des facteurs aggravants (sel, chlorures, eaux etc.) se trouvent présents. La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur, mais se trouve freinée par la formation des carbonates. La vitesse de progression de la carbonatation diminue donc avec la profondeur atteinte. Cette progression est en fait modifiée par des facteurs liés au béton lui-même à savoir : son dosage en ciment, son dosage en eau, sa porosité et au milieu. L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximum pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou saturée.

2.3.2 La corrosion des armatures

La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs. Ce phénomène, d'un caractère essentiellement chimique, a une très grande importance économique puisque actuellement, les pertes dues à la corrosion et les dépenses occasionnées par celle-ci dépassent largement des milliards de dollars par an. Au niveau mondial, on estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par secondes.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées de béton sont protégées contre la corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$. Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. Tant que la présence de chaux

maintient la basicité du milieu entourant les armatures, celles-ci sont protégées. Plusieurs agents peuvent neutraliser cette protection : le gaz carbonique, les chlorures, les sulfates, mais aussi l'eau pure.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est en relation directe avec la porosité du béton et avec la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou de liquides agressifs.

Selon [Mamillan, 1993] l'évolution de la corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux étapes :

1- Au départ, l'acier est stabilisé par la couche de passivation qui empêche la formation de la rouille. Puis durant la phase de l'amorçage, les espèces néfastes vis-à-vis de la corrosion pénètrent dans le béton et l'acier se dépassive alors progressivement. Cette dépassivation peut être engendrée par de nombreux facteurs dont la carbonatation et la pénétration des ions de chlorure.

2 - Les oxydes et hydroxydes produits par des réactions d'oxydation à la surface du métal s'accumulent. La formation de ces produits d'oxydation va alors entraîner un gonflement qui finira par provoquer la fissuration de l'enrobage du béton.

2.3.3 Action des sulfates

Le béton est un matériau poreux. L'eau de l'extérieur peut pénétrer dans son réseau de pores et de capillaires et apporter avec elle des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure.

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.

2.3.3.1 Mécanismes d'attaques des différents sulfates

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion
- Perte des propriétés liantes des C-S-H

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates [Neville, 2000].

- Cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4)

1. Formation de gypse secondaire :



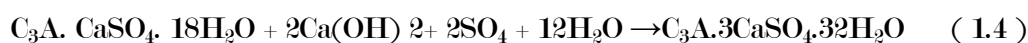
NaOH : alcalinité élevée \rightarrow Stabilisation des C-S-H

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté (pas ou peu d'expansion).

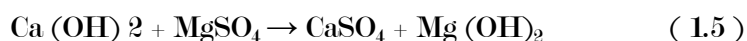
2. Formation d'étringite secondaire : à partir du C_3A anhydre résiduel



à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



- Cas de sulfate de magnésium MgSO_4 (double action)



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH



Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H :



Etant donné la très faible solubilité du $\text{Mg}(\text{OH})_2$, cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates.

Une réaction ultérieure entre le $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et le gel de silice est possible et peut aussi provoquer une détérioration des C-S-H [Neville, 2000].

Le gypse formé occupe un volume plus grand que la portlandite, sa formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte. Lorsque la concentration en sulfates est assez élevée, le gypse restera stable et de nouveaux cristaux de gypse continueront à se former. Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions SO_4 .

Qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'étringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion [Leroux et al, 2000].

Lors d'une attaque du béton par des sulfates externes, sa dégradation se produit par la formation d'étringite ou de gypse et par la pression et la fissuration conséquentes.

2.3.4 Action des acides

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques: l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques. L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agro – alimentaires
- Les réseaux d'égouts.

2.3.4.1 Mécanisme d'attaque des différents acides

Le béton est très alcalin en nature. Il est extrêmement susceptible à l'attaque par l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de « béton lavé » et la porosité augmente. L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction de ce dernier et la partie d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous :

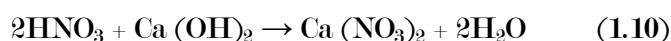


acide hydroxyde de calcium sel de calcium eau

Par exemple :



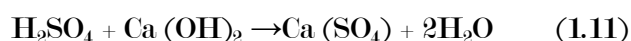
Acide hydroxyde chlorure eau chlorhydrique de calcium de calcium



acide nitrique hydroxyde de calcium nitrate de calcium eau

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous:



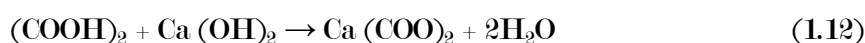
Acide sulfurique + hydroxyde de calcium → sulfate de calcium + eau.

(Le produit de sulfate de calcium contribue à l'attaque de sulfate).

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment La deuxième phase étant la réaction acide silicate de calcium hydraté. Cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

Les attaques acides sont dans leur principe, similaires au phénomène de lixiviation. En effet, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés.

La nocivité de l'attaque acide dépend essentiellement de la solubilité du sel formé par réaction avec la portlandite. Par exemple, pour l'acide oxalique on a :



Le sel formé (oxalate de calcium) est insoluble dans l'eau et donc le béton n'est pas endommagé, c'est aussi le cas avec les acides phosphoriques et tartriques.

Dans d'autres cas, comme celui de l'acide acétique on a :



Le sel formé (acétate de calcium) est très soluble dans l'eau. Comme dans le cas de la lixiviation, la porosité augmente alors et on observe une altération des propriétés du béton.

Parmi les acides fonctionnant sur ce modèle, on citera également les acides, lactiques et formiques, issus par exemple de l'industrie agro-alimentaire.

Le cas de l'acide carbonique (solution aqueuse de CO_2) est un peu particulier. En effet, comme dans le cas du CO_2 sous forme gazeuse, l'acide carbonique réagit avec la prtlandise pour former de la calcite. Mais, s'il y a du CO_2 en excès et si l'eau est douce, la calcite va réagir avec l'acide carbonique pour donner du bicarbonate de calcium très soluble dans l'eau, il y a alors lixiviation. L'agressivité d'une eau contenant du gaz carbonique dépend donc de la quantité de gaz dissous et de la dureté de l'eau.



Dioxyde de carbone calcite



Dioxyde de carbone bicarbonate de calcium

2.3.5 Retrait

Tant le béton autoplaçant que le béton ordinaire sont soumis à un retrait. Le retrait correspond des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas métrises par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations lies au retrait doivent être différencies des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maitrisé par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation.

2.3.5.1 Retrait plastique

Retrait plastique est en relation avec des déformations par tassement générale du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacle tels que des armatures. Ce retrait est limité la période précédant la prise du béton, lors que ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

2.3.5.2 Retrait endogène (appelé aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation)

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus : un processus chimique et un processus physique. Dans un béton ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100×10^{-6} . En ce qui concerne le béton autoplaçant, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant de la sorte au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux ; ils sortent cependant du cadre du présent bulletin. De toute évidence, le retrait endogène du béton autoplaçant requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un béton autoplaçant frais.

2.3.5.3 Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume.

Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation.

L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton autoplaçant. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation.

La diminution du retrait se poursuit avec l'accroissement de l'humidité relative. L'addition de fumées de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus.

Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

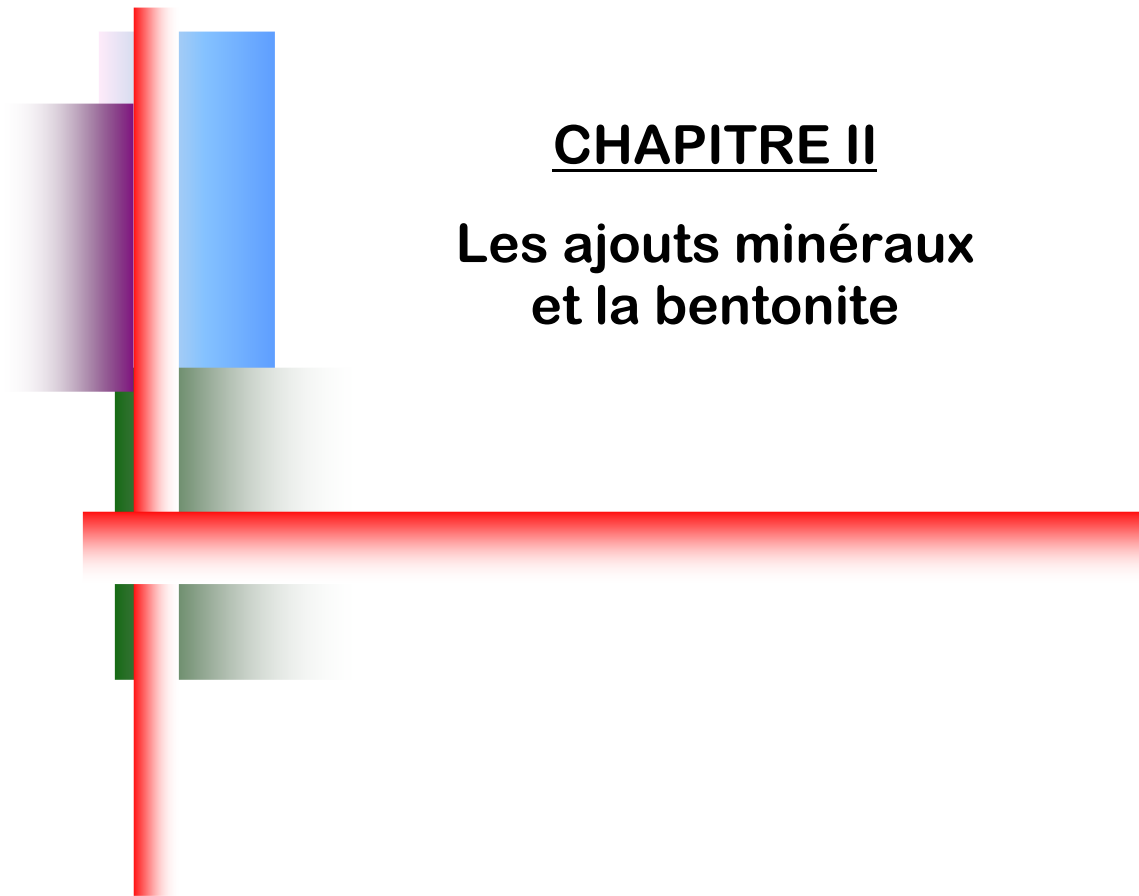
2.3.5.4 Le retrait thermique

Le retrait thermique est lié au retour température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Ce retour température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieure 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise œuvre, jusqu'à quelques semaines, sa durée tant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente).

Ces quatre types de retrait peuvent se cumuler l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Enfin, le retrait d'auto-dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la périphérie des éléments en béton. Il existe un cinquième type de retrait, le retrait de carbonatation, pour lequel il n'existe que peu de données expérimentales l'heure actuelle. Ce retrait est lié aux réactions de carbonatation des constituants du ciment.

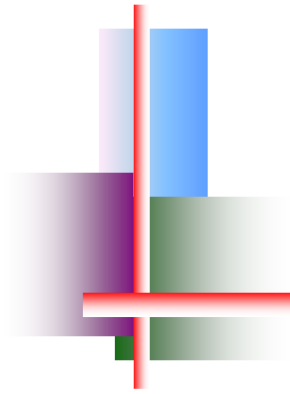
2.4 Conclusion

Cette partie bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives à la durabilité des bétons autoplaçants, bétons de fabrication récente, tels que les données de travaux de recherche de cet domaine disponibles étaient nombreuses, ce qui signifiait clairement qu'un besoin en recherche était nécessaire dans ce domaine.



CHAPITRE II

Les ajouts minéraux et la bentonite



Chapitre II : Les ajouts minéraux et la bentonite

1. LES AJOUTS MINÉRAUX

1.1 Introduction

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique et environnemental, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (NFP 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :

Pouzzolane + chaux + eau \rightarrow Silicate de calcium hydraté

Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_2S et du C_3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier. Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H.

Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète.

Ces matériaux étant des sous produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définis que celle du ciment Portland.

1.2 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006], les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en inertes et actifs. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

1.2.1 Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (NFP 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

1.2.1.1 Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (Fig. II.1) (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes ...). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.



Fig. II .1:Filler calcaire

1.2.1.2 Poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/g . le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

1.2.2 Ajouts minéraux actifs

1.2.2.1 Pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [Venuat , 1998].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

- **Pouzzolane naturelle**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques (Fig. II.2).

Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



Fig. II.2 : Pouzzolane naturelle

- **Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [Venuat ,1998]:

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

- **Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [Sersale ,1980] et [Pichon et al. ,1996].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas à déterminer la réactivité pouzzolanique.

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [Venuat, 1989].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

- **Propriétés physiques de remplissage**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

1.2.2.2 Fumée de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages (Fig. II .3).

Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre de l'ordre de 0.1 μm . Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à 15 m^2/g . Les fumées de silice ont des propriétés pouzzolaniques avérées [Mehta, 1986].

Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrossilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 . Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice.

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 .

La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe –Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse.

Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.03 μm et 0.3 μm (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 μm), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron.

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumée de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1.

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie.
- Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.



Fig. II.3 : Fumée de silice

1.2.2.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules (Fig. II.4) dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à

7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (Gypse).



Fig. II.4 : Laitier de haut fourneau

1.2.2.4 Cendres volantes

Les cendres volantes sont définies comme des matériaux extraits des gaz de combustion d'un four chauffé avec les charbons. Les cendres volantes se présentent sous forme de poudre constituée essentiellement de particules sphériques (Fig. II.5) : des micro-billes, [Colin ,2000]. Les cendres volantes peuvent être considérées comme des limons fins non plastiques par le système unifié de classification des sols USCS 28 [Çokça ,2001]. Elles n'ont pas de propriétés hydrauliques par elles-mêmes mais elles fixent la chaux libre pour former des composés qui possèdent les propriétés des liants hydrauliques [Croisé, 1964].



Fig. II.5 : Cendre volante

Les cendres volantes sont classées selon deux types de classe suivant leurs compositions chimiques par l'ASTM (American Society for Testing and Materials) : la classe "F fly ash" et la classe "C fly ash". La classe "F fly ash" est un produit de l'antracite et de charbon bitumineux en général. Ces cendres volantes sont pouzzolaniques dans la nature et elles comprennent moins de 10% de chaux (CaO). Selon les propriétés pouzzolaniques, la silice et l'alumine (Fig. II.6) de la classe des cendres volantes F a besoin d'un agent de cimentation : le ciment Portland, les chaux en cas de présence d'eau, afin d'obtenir des composés cimentaires. D'ailleurs le produit chimique comme le silicate de sodium peut être l'agent de cimentation. La classe "C fly ash" est un produit du lignite et de charbon sous-bitumineux sans les propriétés pouzzolaniques. Elles ont une certaine propriété cimentaire. Elles contiennent plus de 20% de chaux (CaO). La classe C n'a pas besoin d'activateur par rapport à la classe F parce que les valeurs des alcalins et du sulfate (SO_4) sont plus élevées dans la classe C. Mais la classe C durcira très longtemps avec de l'eau.

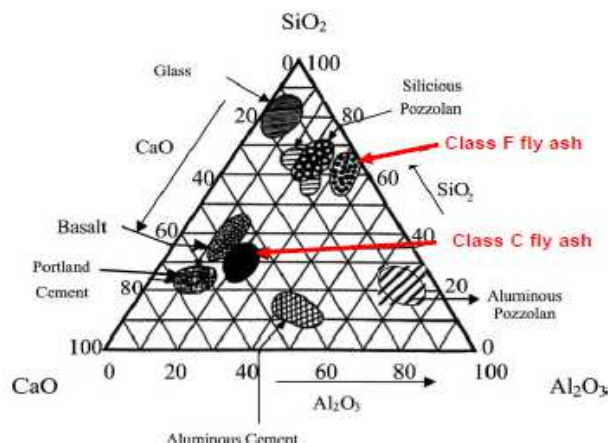


Fig. II.6 : Diagramme ternaire de KEIL-RANKIN, d'après [Minoux ,1994]

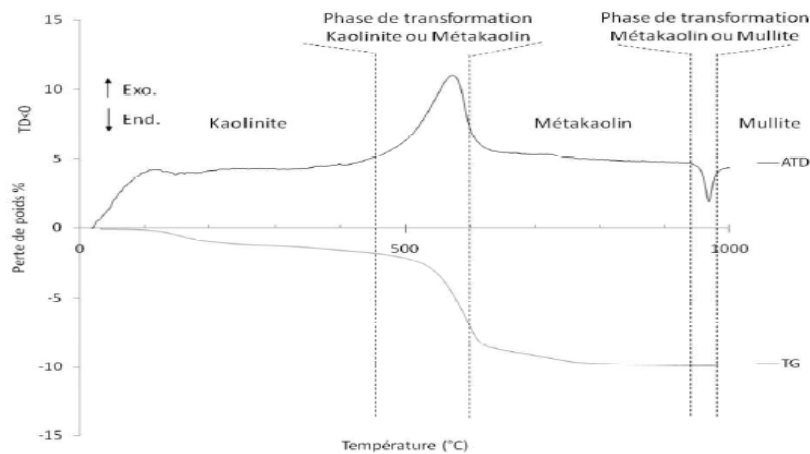


Fig. II.7 : Spectres d'analyse thermique (ATG/ATD) de la kaolinite [Samet et al., 2007]

1.3 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

1.3.1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation du crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout [Beniremour, 1993]. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles [Mebrouki, 2003].

Des sous produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus.

1.3.2 Intérêt du point de vue technique

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C_3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique.

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfate ou acide.

1.3.3 L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Le Tableau II.1 donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau II.1 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [Aichouba, 2005]

| Entreprise | Cimenterie | Ajouts Utilisés |
|-------------|------------------------|-----------------|
| ERCE | Ain Touta | Pouzzolane |
| | Ain El Kebira | |
| | Hamma Bouziane | |
| | H'djar Essaoud Laitier | Laitier |
| | Tebessa | |
| ERCC | Meftah | Tuf / Calcaire |
| | Raiss Hamidou | Poussière |
| | Sour EL Ghozlane | Calcaire/Tuf |
| ECDE | Chlef | Calcaire |
| ERCO | Beni Saf | Pouzzolane |
| | Zahana | |
| | Saida | |

1.4 Hydratation des ciments pouzzolaniques

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane peuvent être considérées séparément, bien que dans une certaine mesure elles se produisent en même temps. En fait Pouzzolanique, qui est plus lente que la réaction d'hydratation du ciment, peut avoir lieu seulement après l'hydrolyse de C_3S et de C_2S qui forment l'hydroxyde de calcium [Mehta, 1981].

Il est à noter que la première consommation de chaux, tandis que la dernière est une réaction de production de chaux.

En ce qui concerne la réaction pouzzolanique, puisque les composants principaux sont SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO , les produits de l'hydratation du ciment Portland, ces produits sont le silicate de calcium hydraté (CSH) et l'aluminate de calcium hydraté (CAH) qui sont les produits de la réaction entre la silice et l'alumine de la pouzzolane avec l'hydroxyde de calcium [Shi et al., 2000]

1.5 Influence des ajouts minéraux sur les caractéristiques du béton autoplaçant

Nombreuse sont les études qui ont pour objectif de trouver une bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP) en utilisant divers ajouts minéraux. Parmi ces études on cite :

1.5.1 Influence des ajouts sur les caractéristiques à l'état frais

- [El Hilali et al., 2005] traitent dans leur étude l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP frais montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative.
- [Bouhamou et al., 2004] ont montré que l'incorporation des fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais à base de matériaux locaux notamment le sable de mer et le sable de carrière. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP. Les résistances élevées des BAP sont liées au volume de pâte important. L'utilisation du superplastifiant "viscocrete 20HE" dans les formulations autoplaçantes peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.
- [Mébrouki et al., 2007] a étudié l'influence de l'ajout des fillers calcaires locales d'Algérie (carrière de Kristel d'Oran) sur la pâte autoplaçante. Les pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre constituant de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). La pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler. Il a constaté que l'incorporation d'une quantité importante de fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant (pâte sec ou très ferme). L'ajout de filler dans la pâte de ciment conduit à une diminution de la valeur d'étalement de la pâte et en contrepartie le filler améliore l'écoulement de la pâte.
- L'un des critères qui qualifie un béton autoplaçant est son étalement, qui doit être compris entre 60 et 75 cm. Une étude [Rackel, 2001] a prouvé que le béton témoin ainsi que le béton

avec 25% de métakaolin (MKF) respecte cette caractéristique. Seul le mélange filler (F) plus métakaolin entraîne une diminution de l'étalement par rapport au témoin (Fig. II.8).

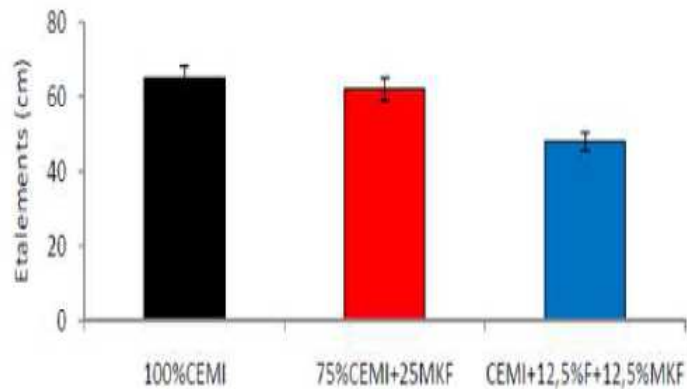


Fig. II.8: Etalement des bétons autoplaçants [Rackel, 2001]

Par ailleurs, lors de la manipulation des BAP celui avec 25% de MKF semblait plus visqueux que le béton témoin, ce qui peut être un avantage pour des problèmes propres à ce type de béton tel que la ségrégation [Rackel, 2001].

1.5.2 Influence des ajouts sur les performances mécaniques

- Necira a effectué des essais sur des bétons autoplaçants confectionnés avec trois types d'ajouts minéraux (Fillers calcaires FC, Pouzzolane naturelle PZ et le laitier du haut fourneau LT). Il a conclu que l'introduction des ajouts minéraux tels que (FC, PZ et LT) améliore considérablement les propriétés rhéologiques des BAP et que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles au pourcentage d'ajout minéral. Il a conclu aussi que le BAP contenant le laitier du haut fourneau donne des résistances à la compression plus élevées que les BAP contenant les fillers calcaires ou les pouzzolanes naturelles.
- [Samara, 2007] a étudié la possibilité d'utiliser les sédiments des cours d'eau comme un fillers dans la composition du béton autoplaçant. Il a effectué des essais sur deux types de béton autoplaçant, le premier est à base de fillers calcaires et le deuxième à base de sédiments. Il a observé une perte de maniabilité sur bétons et mortiers à l'état frais, cette perte est due au pouvoir d'absorption d'eau des sédiments liée à la porosité inter granulaire des sédiments traités. Les résistances à la compression sont similaires aux résistances données par les bétons à base de fillers calcaires.
- [Ayed et al. ,2006] a élaboré à partir d'une même formulation de base, trois BAP de même classe de résistance incorporant chacun un type de fines locales d'Algérie, à savoir des fines siliceuses provenant des déchets de sable siliceux servant à la fabrication du verre, des fines

pouzzolaniques naturelles et des fines calcaires. L'analyse comparative des résultats a permis de mettre en évidence l'influence du type d'addition minérale sur le comportement à long terme des BAP.

- [Rebouh ,2006] a trouvé que l'ajout des cendres volantes dans la composition du béton autoplaçant améliore les caractéristiques de ce dernier, et augmente les résistances mécaniques au jeune âge.
- [Haddad et al. ,2003] ont travaillé sur des mortiers issues des formules de BAP, ces mortiers sont obtenues en faisant varier le dosage en addition de fillers calcaires (15, 30, 50%). Les résultats montrent que l'addition d'un pourcentage différent en fillers n'a pas une influence significative sur l'âge du début et fin de prise. Concernant les résistances mécaniques en compression, ils ont conclu qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de fillers introduit et donc au rapport E/C.
- [Davood, et al. ,2015] Cette étude contribue à la formulation et la caractérisation de BAP plus écologiques basés sur l'utilisation d'additions minérales en substitution du ciment portland. Trois types d'additions sont traités : du métakaolin (MK), du laitier de haut fourneau et des cendres volantes. Quatre BAP ont été formulés à partir d'une même composition où seule la nature du liant change : CEM I (BAP de référence), CEM I+15% de MK, CEM III et CEM V. Pour les BAP à base de CEM III et CEM V, les faibles valeurs de résistance à la compression aux jeunes âges peuvent être expliquées par la lente hydraulité et pouzzolanité du laitier. Dès 28 jours, résistance à la compression du BAP-CEM III (41 MPa) dépasse celle du BAP de référence et la dépasse de 17% à 360 jours (Fig. II.9) :

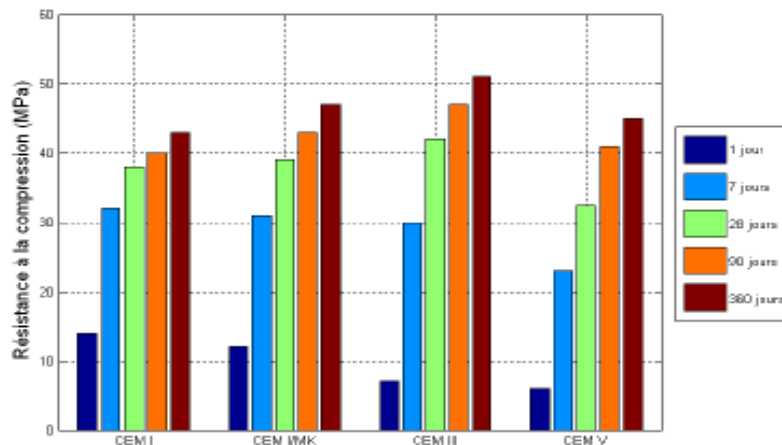


Fig. II.9 : Evolution des résistances à la compression au cours du temps et en fonction de la nature du liant [Davood et al. ,2015]

1.5.3 Influence des ajouts sur la durabilité du béton autoplaçant

1.5.3.1 Les attaques acides

▪ [Kostuch et al. ,1993] ont montré qu'en substituant 10% de métakaolin la résistance aux attaques acides est augmentée. Il associe ce phénomène à deux paramètres qu'induit la substitution de métakaolin dans la matrice cimentaire :

1. Le métakaolin diminue le coefficient de transfert donc l'avancée de la solution acide.
2. La réaction pouzzolanique transforme la portlandite en CSH qui a un coefficient de solubilité plus bas et donc améliore la résistance du béton envers ces attaques.

▪ D'après [Roy, 2001], la résistance aux attaques acides des liants avec métakaolin augmente avec le taux de substitution. La perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution augmente de 7,5 à 22,5 %.

▪ [Rahmani et al. ,2008] ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats (Fig. II.10), après 6 mois d'immersion, montrent une perte de masse de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), de 56,6 % pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) de 30,1 % pour le filler + pouzzolane naturelle (C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire filler + fines de pierre ponce (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique.

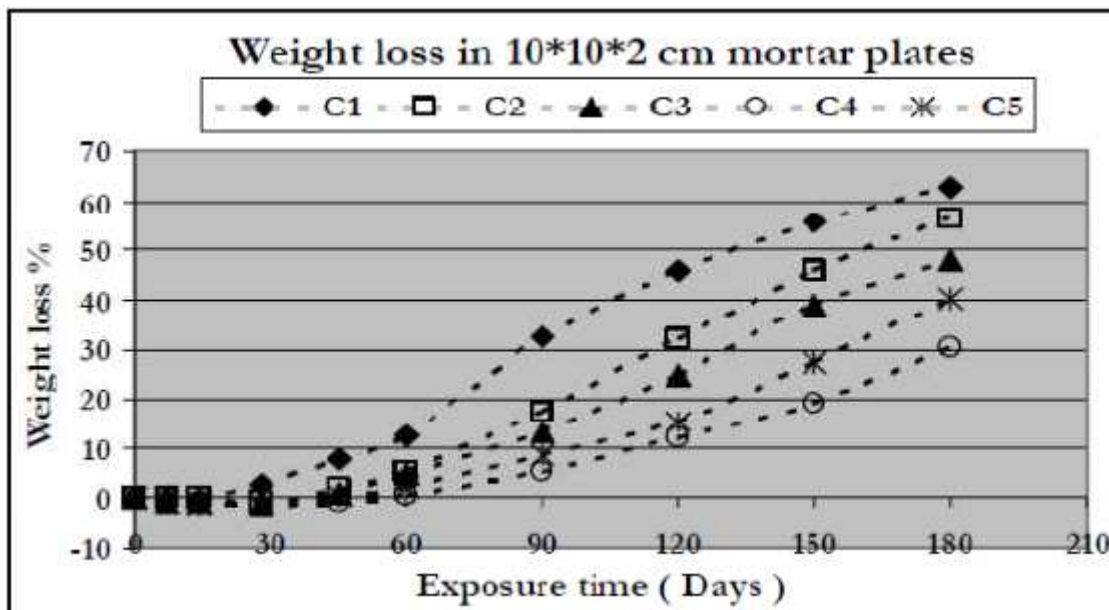


Fig. II.10 : Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [Rahmani et al. ,2008]

▪ D'après le travail de [Belaribi, 2015] la formulation qui couvre quatre types de BAP de même classe de résistance: un BAP à base de pouzzolane naturelle (BAP-PZ), un BAP à base de vase calcinée du barrage de Chorfa (BAP-VC), un BAP à base de vase calcinée du barrage de Fergoug (BAP-VF) et enfin un BAP témoin sans ajout (BAPT), incorporant respectivement 20% de pouzzolane naturelle et 20% de vase calcinée substituées partiellement au volume du ciment. Les résultats montrent que : L'incorporation de la vase calcinée dans les BAP améliore la résistivité de ces bétons vis-à-vis de l'attaque de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et chlorhydrique (HCl). Le BAP VC et le BAP VF présente des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures que celles du BAPT (Fig. II.11).

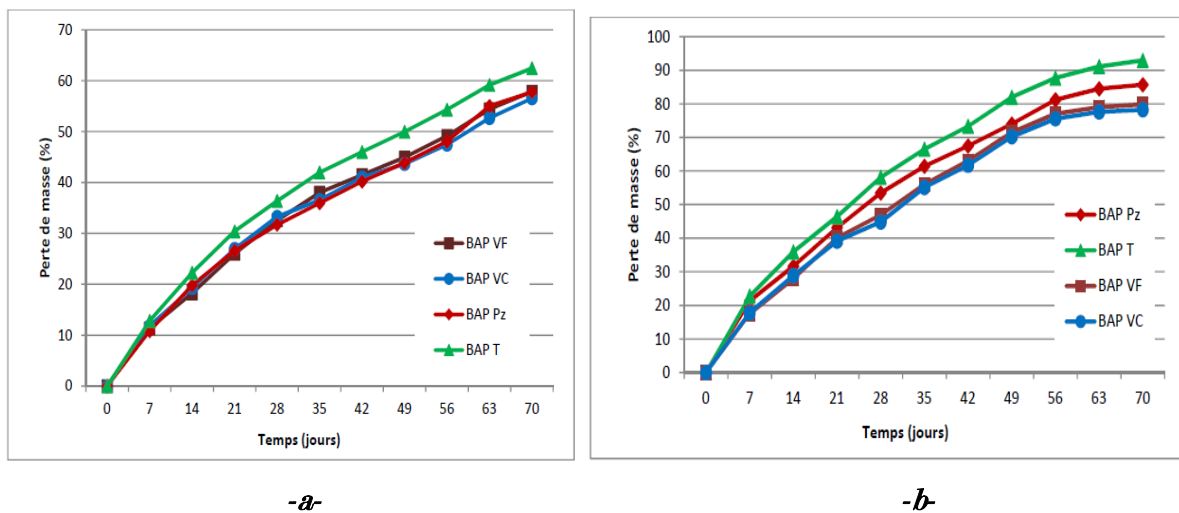


Fig. II.11 : Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en (-a- H_2SO_4 -b- 5% HCl.) [Belaribi, 2015]

1.5.3.2 Les attaques sulfatiques

▪ Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l'attaque sulfatique interne [Brunetaud, 2005 ; Pavoine, 2003], qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton (DEF), de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.

- Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates [Siad et al. ,2010], l'accroissement du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et l'augmentation du rapport $E/L_{\text{équi}}$ a été constaté. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile [Siad et al. ,2010] (Fig. II.12).

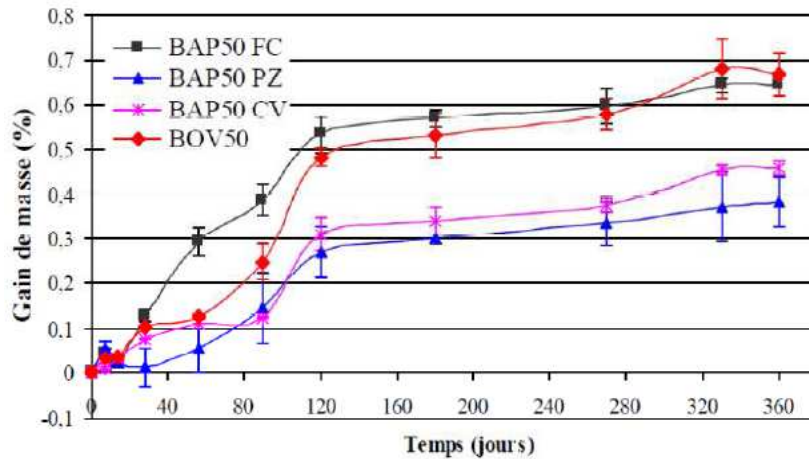


Fig. II.12: Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [Siad et al. ,2010]

Les résultats des BOV et BAP (à base de pouzzolane PZ, de cendres volantes CV et de fillers calcaires FC) montrent que la comparaison entre ces deux types de béton est en rapport direct avec l'addition minérale utilisée dans les BAP. Les BAPPZ et les BAP CV présentent un gain de masse moins important que celui des BOV de même classe de résistance. Le BAP70FC et le BAP50FC présentent un gain de masse presque similaire avec celui du BOV70 et du BOV50 en prenant en compte la dispersion des mesures. L'évolution de la masse du BAP30FC est moins importante que celle du BOV30, mais elle est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium.

- [Belaribi ,2015] montre que L'immersion des échantillons de BAP dans la solution de sulfate de sodium et sulfate de magnésium, dans une durée d'immersion (360 jours pour le suivi la résistance à la compression) (Fig. II.13) que, la résistance du BAP.PZ continue d'augmenter jusqu'à 360 jours d'immersion. La conservation dans la solution sulfatique ne semble pas beaucoup influencer la résistance de ce type de BAP. Cependant, quelques échantillons de BAP.VC et BAP.VF ont montré une faible perte de la résistance à la compression par rapport au BAP.PZ. Le BAP-VC présente des résistances meilleures au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution $MgSO_4$.

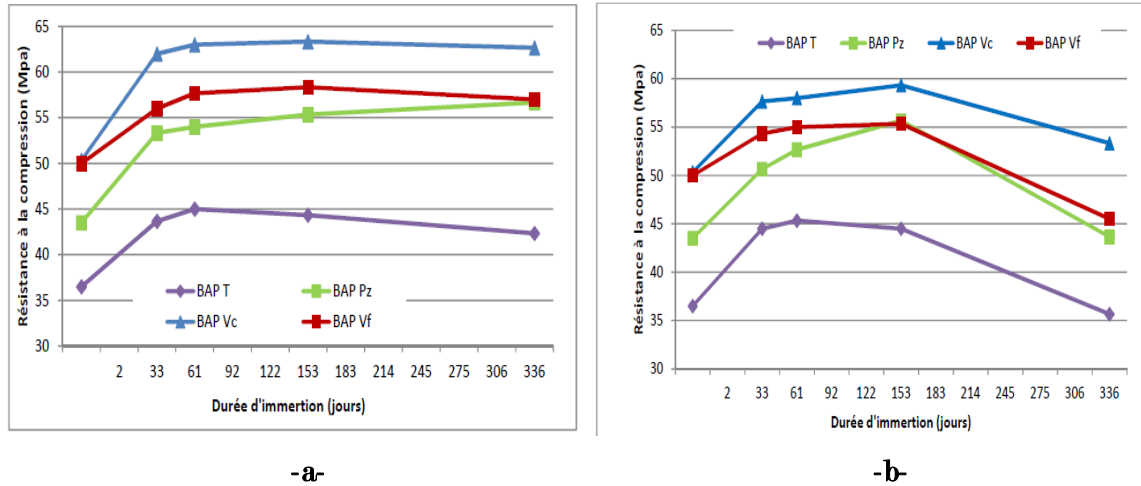


Fig. II.13: Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans les solutions (-a- 5% Na_2SO_4 ; -b- 5% MgSO_4) [Belaribi ,2015].

1.5.3.3 Carbonatation

- D'après [Siad ,2010] qui montre les valeurs des profondeurs carbonatées pour les BAP de classe 50 MPa sont comprises entre 0 et 3 mm. En revanche, celle du béton ordinaire vibré atteint une valeur de 6 mm à 56 jours. On remarque que la cinétique de carbonatation du BAP50 PZ est plus faible que celle du BAP50 CV qui à son tour est plus faible que celle du BAP50 FC (Fig. II.14) .

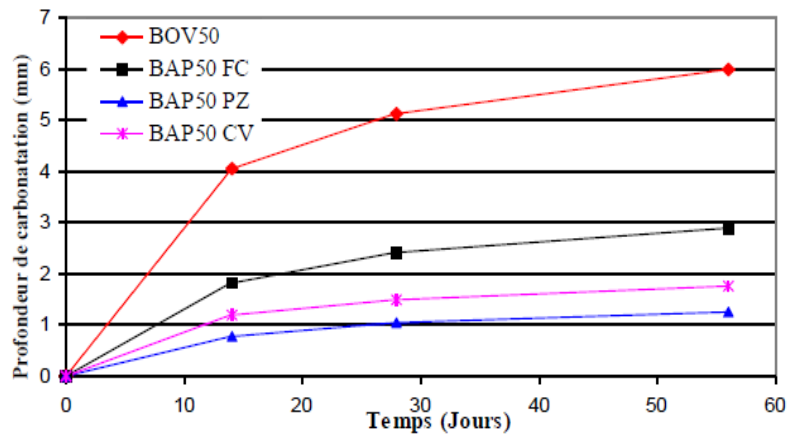


Fig. II.14 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [said ,2010].

1.5.3.4 Retrait

▪ D'après le travail de [Bouhamou et al., 2014] qui consiste à élaborer des ciments pouzzolaniques en substituant partiellement du ciment (CEMI) par la vase draguée du barrage de Fergoug a pour objectif l'étude de l'influence de cette vase calcinée à 750°C, sur le comportement d'un béton autoplaçant (les déformations différées par retrait). Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser des BAP à base de vase calcinée :

- Retrait endogène

D'après la Figure II.15, les cinétiques des déformations du retrait endogène des bétons BAPV, sont assez semblables. Le BAPT présente les déformations les plus élevées, dès les premiers jours et pour toute la durée des essais, celles des BAPV diminuent avec l'augmentation du dosage.

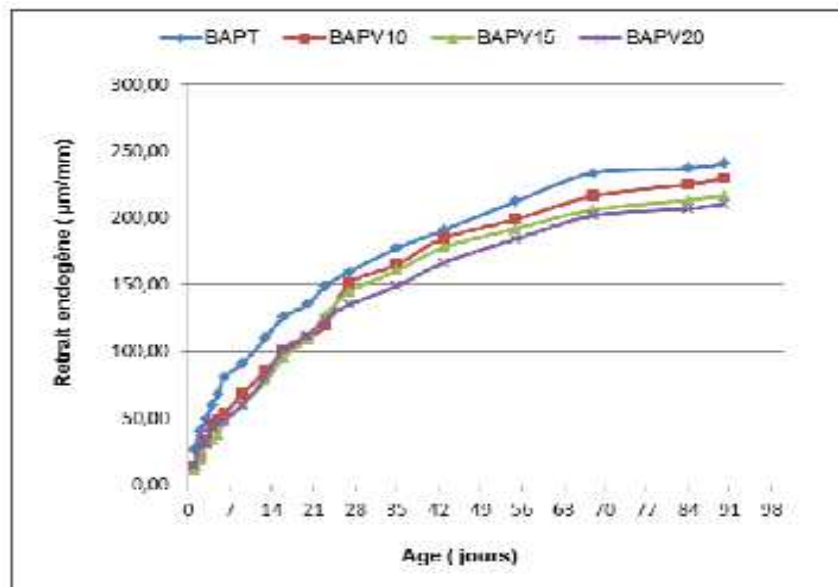


Fig. II.15 : Évolution du retrait endogène dans le temps [Bouhamou et al., 2014]

- Retrait de dessiccation

Les courbes obtenues pour les BAP apparaissent dans un fuseau (Fig. II.16). L'évolution du retrait des BAPV par rapport au BAT est assez marquante. La deuxième phase de cette évolution commence à ralentir jusqu'à devenir presque constante jusqu'à 90 jours.

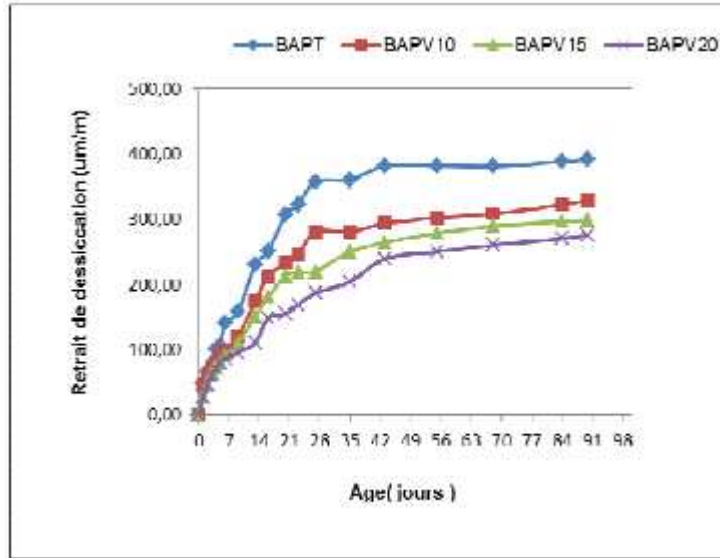


Fig. II.16 : Évolution du retrait de dessiccation dans le temps [Bouhamou et al., 2014]

La Figure II.17 montre aussi que les différentes courbes d'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse, sont représentées en deux phases; la première schématise un premier départ d'eau sans conséquence sur le retrait, la deuxième schématise évolution du retrait avec la perte d'eau.

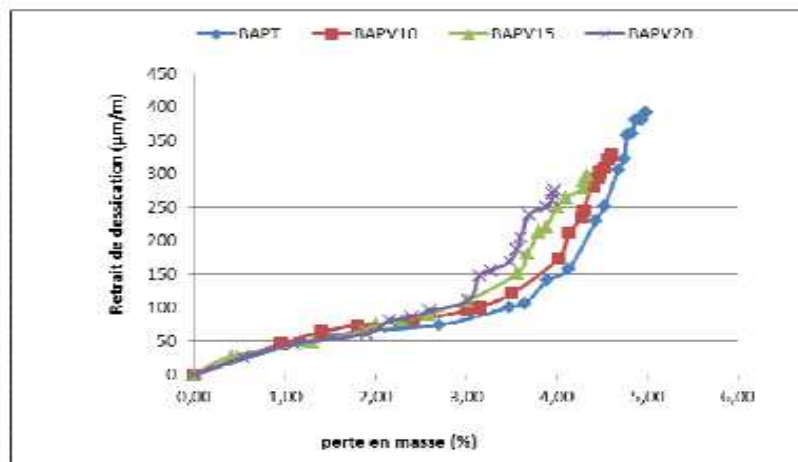


Fig. II. 17 : Retrait de dessiccation en fonction de la perte de la masse [Bouhamou et al., 2014]

- Retrait total

Il évolue très rapidement pour tous les types d'éprouvettes conservées à l'air, à cause de la taille de ces dernières qui rend la dessiccation plus favorable (Fig. II.18). Le BAPT présente les retraits totaux les plus élevées pour toute la durée des essais, celles des BAPV diminuent avec l'augmentation du dosage.

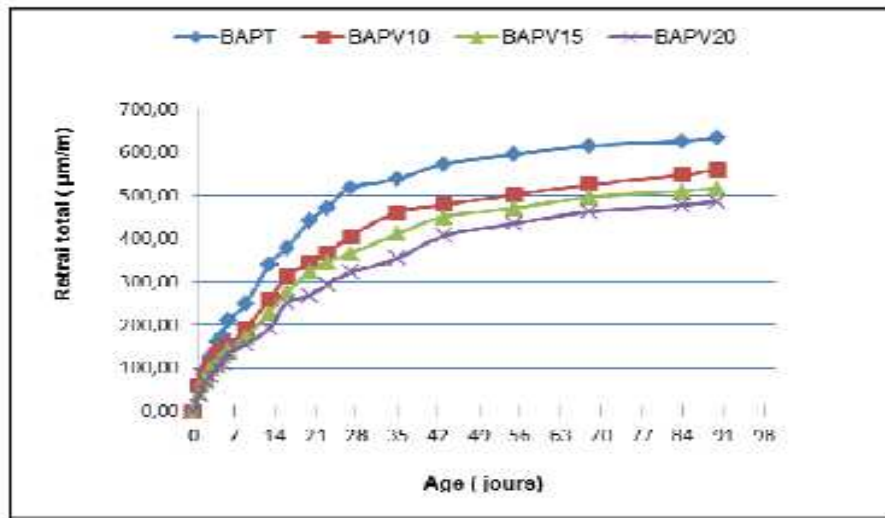


Fig. II.18 : Retrait total en fonction du temps [Bouhamou et al., 2014]

- Dans les travaux de [Ayed et al., 2009], il a été mesuré le retrait endogène et total de bétons autoplaçants à base des filler calcaire et pouzzolane naturelle (Fig. II.19).

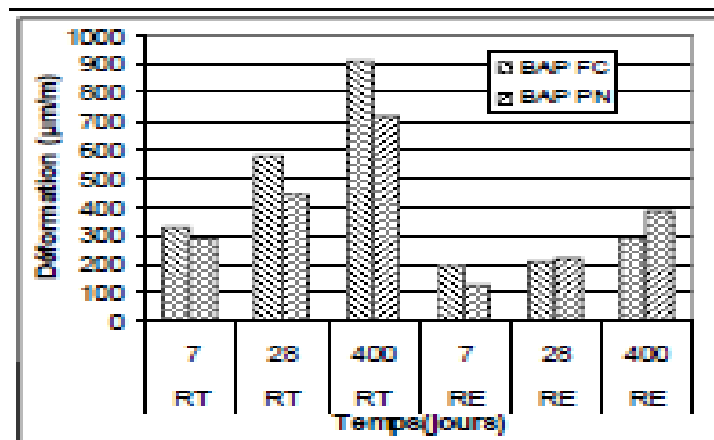


Fig. II.19 : Evolution du retrait des différents BAP (RT : Retrait total, RE : Retrait endogène) [Ayed et al., 2009]

Quand on examine les écarts, entre les BAP, à 7, 28, 34, 400 jours, suivant la Figure II.19, on observe qu'à 7 jour d'âge, la déformation endogène des BAP FC et BAP PN présente un écart très important en faveur des BAP PN, environ de 35%. À 28 jours, l'écart entre BAP FC et BAP PN est presque nul. A long terme, 400 jours, le retrait endogène du BAP PN devient important par rapport au BAP FC. Le BAP PN a un retrait endogène plus grand de 32% par rapport au BAP FC.

1.5.3.5 Comparaison de retrait du béton vibré et du béton autoplacant

- Retrait plastique

Plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [Gram, 1999; Turery, 2004]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (voir Figure II.20). Pour Turery (Fig. 1.21), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

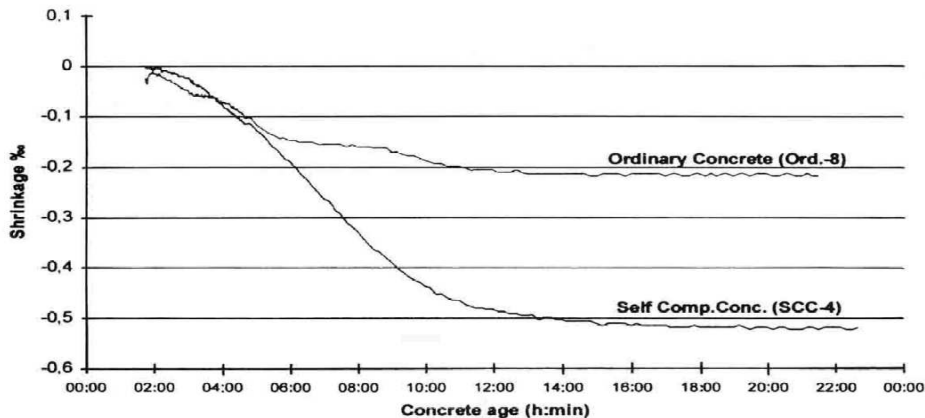


Fig. II.20 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure ($T = 20^{\circ}\text{C}$, 50% HR) [Gram, 1999]

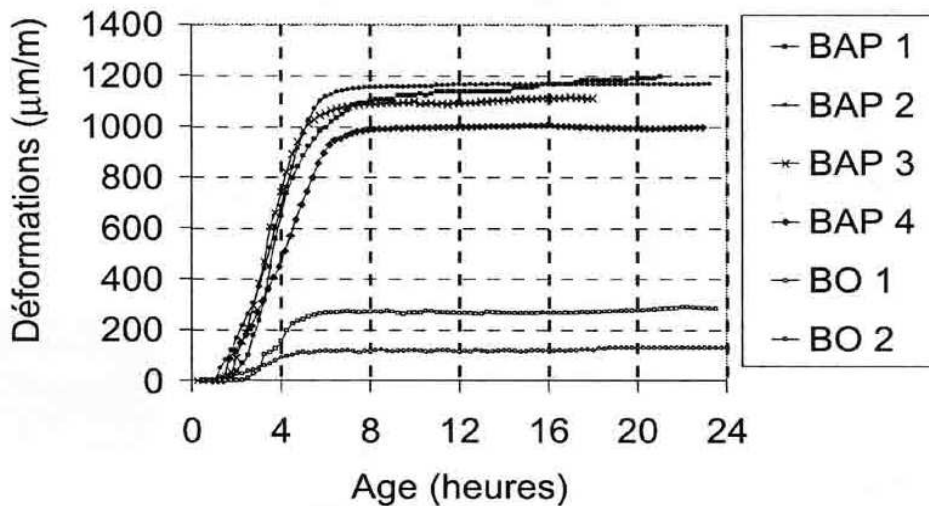


Fig. II.21 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [Turery, 2004]

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et

un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

- Retrait endogène

▪ D'après les recherches bibliographiques les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [Hu, 1998] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir Figure II.22), d'autres [Pons, 2003] (Fig. II.23) contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

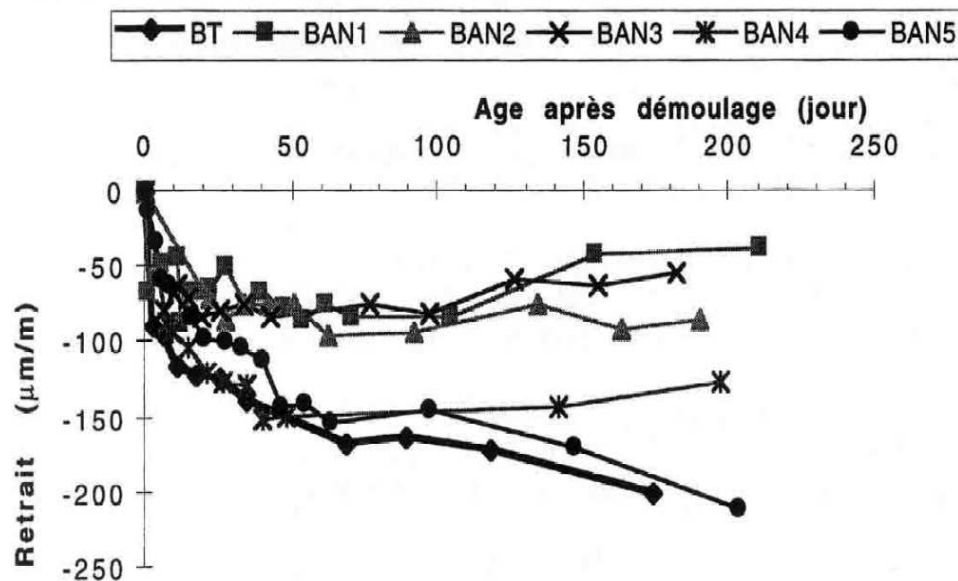


Fig. II.22 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu, 1998]

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus,

pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [Pons, 2003] (Fig. II.23)

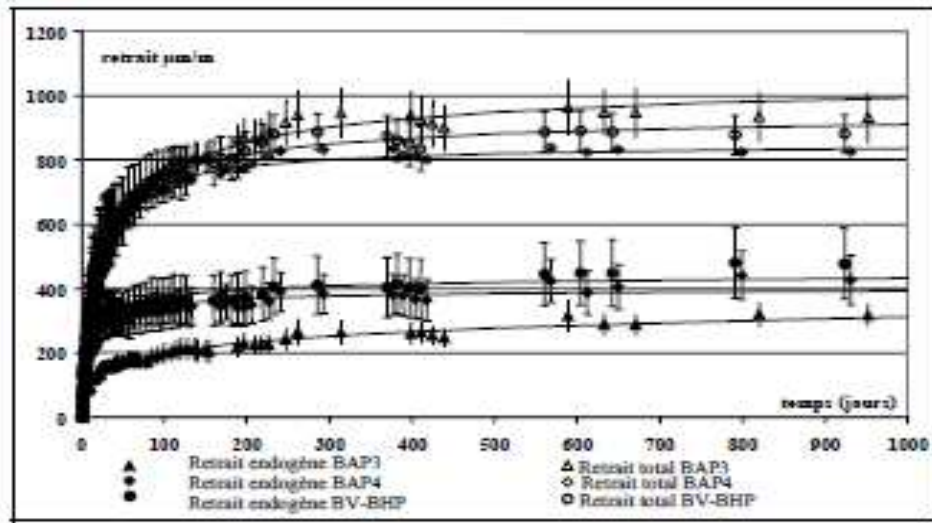


Fig. II.23 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [Pons, 2003]

- [Persson, 1999] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (voir Figure II.24).

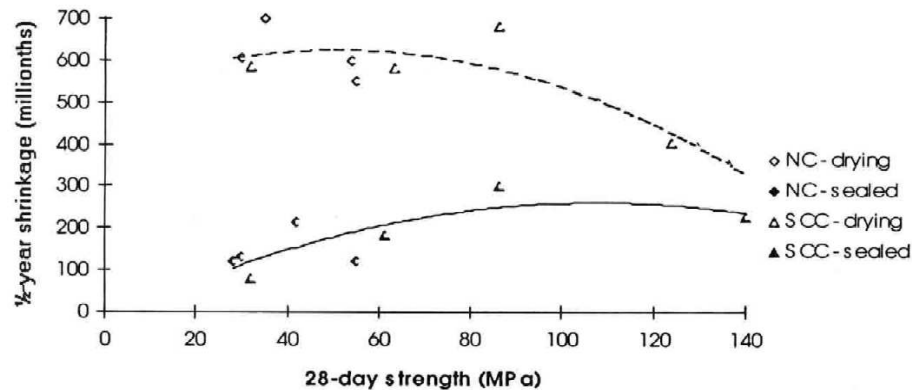


Fig. II.24 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [Persson, 1999]

- Retrait dessiccation

- Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [Hu, 1998] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir Figure II.25). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

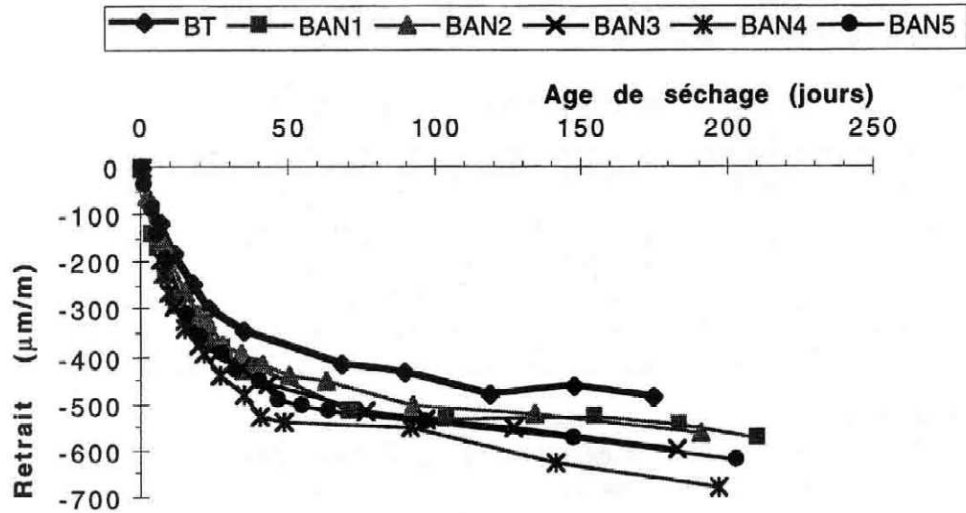


Fig. II.25 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu, 1998]

- D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [Persson, 1999, Sakata, 1998]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).
- Enfin, d'autres auteurs [Sonebi, 1999] observent des retraits de séchage des BAP moins importants (voir Figure II.26) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [Neville, 2000], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

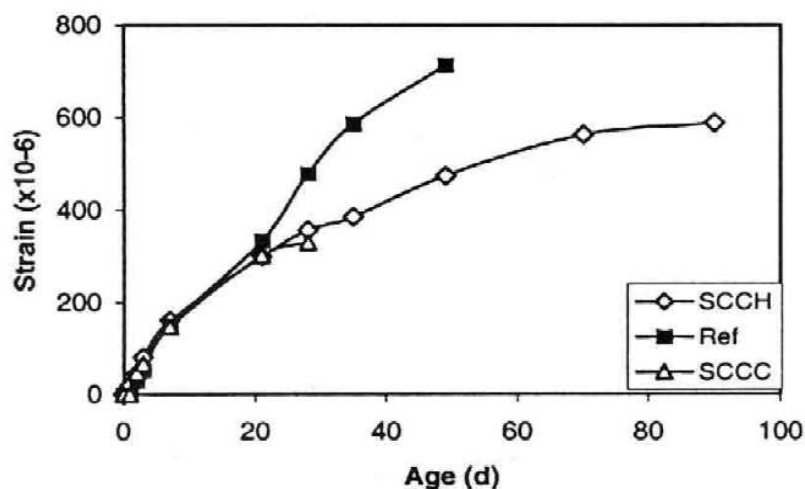


Fig. II.26 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [Sonebi, 1999]

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle (voir Fig. II.27).

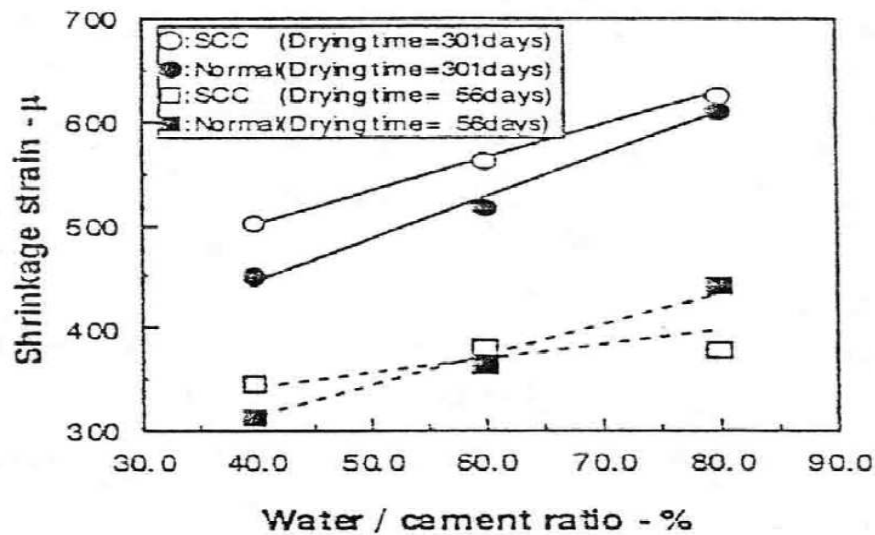


Fig. II.27 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [Sakata, 1998]

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Van [Van, 1999], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [Hasni, 1999].

1.6 Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les bétons autoplaçants est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des bétons autoplaçants à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques et durabilités des bétons autoplaçants à

l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments granulaires.

2.1 LA BENTONITE

2.1 Introduction

Les argiles sont définies comme les particules dont la dimension des grains est inférieure à 2 microns. Elles sont constituées de plusieurs centaines de feuilles empilées les unes sur les autres. Chaque feuille est à son tour composée de différentes couches entre 2 et 5), qui varient d'un type d'argile à l'autre mais qui sont souvent une combinaison de couches de silicate et d'aluminates. Leur composition chimique et leur taille leur confèrent un réel potentiel pour une utilisation en tant que pouzzolane dans le ciment. La calcination est une étape essentielle dans le développement d'une pouzzolane artificielle à partir d'une argile, car elle permet le passage d'une structure cristalline (Un arrangement ordonné des atomes) à une structure amorphe (une structure désordonnée des atomes). Sans cette calcination ou activation thermique, les cristaux d'argiles seraient dans un état trop stable qui empêcherait toute réaction avec l'hydroxyde de calcium provenant du ciment. Le métakaolin est un exemple d'argile calcinée déjà utilisée par les cimentiers. Il est produit par calcination du kaolin, une argile qu'on trouve par tout dans la croûte terrestre. Cette pouzzolane est très réactive ; la substitution de 5% à 10% de ciment par du métakaolin peut augmenter sensiblement les propriétés mécaniques du béton. Le problème est que le Kaolin dispose de propriétés recherchées pour d'autres types d'applications, comme les cosmétiques, l'alimentaire ou encore la porcelaine, ce qui renchérit sensiblement le prix et diminue fortement sa disponibilité pour l'industrie de la construction. Par conséquent, le métakaolin n'est aujourd'hui employé dans le béton qu'à de très faibles taux de substitution de ciment et pour des applications très spécifiques. On a donc cherché à voir s'il serait possible de produire des pouzzolanes en calcinant des mélanges d'argiles largement disponibles. Pour ce faire, on a d'abord étudié le comportement thermique de trois des argiles des plus répandues que sont le kaolin ou kaolinite si on se réfère à la forme cristalline du matériau, l'illite et la montmorillonite (Fig. II.28). Ceci a permis de comprendre le mécanisme de décomposition thermique de diverses structures argileuses et l'influence de cette décomposition sur la réactivité pouzzolanique du matériau calciné une fois mélangé au ciment et à l'eau.

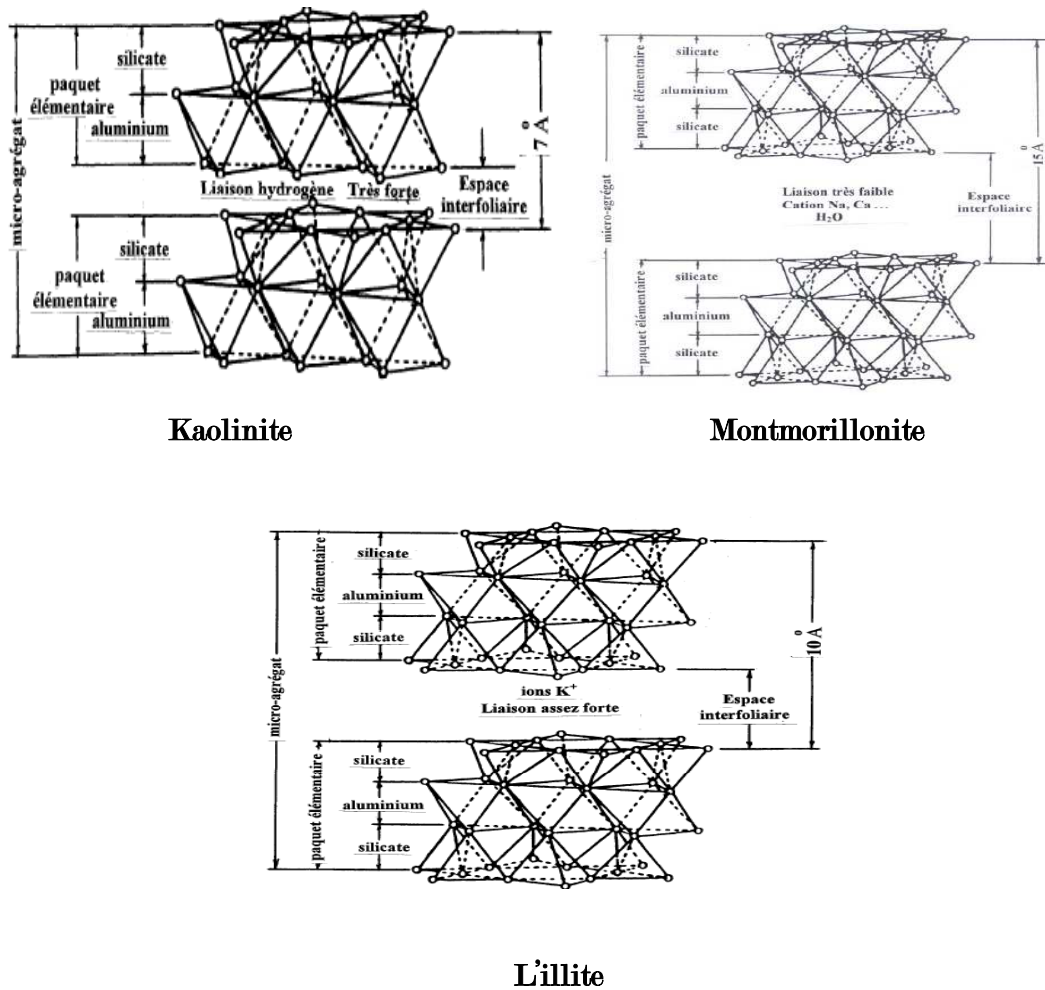


Fig. II .28 : Structures cristallines de trois types d'argiles

Dans un second temps, divers travaux ont été réalisés sur des matériaux tels que les sédiments de dragage et les argiles vaseuses et gréseuses, utilisés comme éléments substituables au ciment pour la confection des matériaux cimentaires [Bibi et al., 2008 ; Belas et al., 2009 ; Belaribi, 2014 ; Benaïssa et al., 2016]. Toutes ces études ont confirmé la possibilité de valoriser ces ajouts en tant que substituts partiels au ciment afin d'obtenir des mortiers ou bétons de bonnes qualités rhéologiques et mécaniques et la bentonite (l'argile de type montmorillonite) l'un des matériaux intéressants par l'utilisation de ressources locales.

2.2 Définition

Le terme BENTONITE désigne les matériaux argileux à usage industriel, essentiellement composés de smectites et plus particulièrement de montmorillonite. Les propriétés de

gonflement et de perméabilité des bentonites dépendent étroitement de la nature du cation compensateur [Boutarfa ,2012].

La bentonite est une argile dont le nom vient de Fort Benton aux Etats-Unis, connue aussi sous le terme de terre à foulon. Elle peut être considérée comme une smectite, étant essentiellement type de phyllosilicate constituée de montmorillonite $(\text{SiO}_2)_m(\text{Al}_2\text{O}_3)_n(\text{H}_2\text{O})_p$, ce qui explique sa capacité de rétention d'eau. On trouve également d'autres minéraux comme le quartz, le mica, le feldspath, la pyrite ou la calcite. Les gisements de bentonites sont d'origines volcaniques et hydrothermales [Boutarfa , 2012].

2.3 Historique de la bentonite

De nombreuses espèces d'argiles étaient connues et utilisées dans l'industrie céramique ou comme terres décolorantes, terres à foulon

- Lorsque en 1888 fut découvert à FORT-BENTON, région de ROCK-GREEND dans Wyoming, une nouvelle variété aux propriétés curieuses.
- Cette terre, en particulier, était douée de la faculté de gonfler dans l'eau en donnant une masse volumineuse et gélatineuse. De ce fait elle attira l'attention du monde scientifique et elle fut dénommée du lieu d'origine : bentonite.
- En 1897 dix ans après cette découverte le géologue W.C Knight publiant une étude, déjà très complète sur cette curieuse argile aux propriétés si singulières.
- En 1928 quarante ans après la découverte la production était passée à 40.000 tonnes et le produit n'intéressait plus seulement le monde scientifique mais une multitude d'utilisateurs. Une étude détaillée fut publiée sur ce produit en si belle expansion par le bureau de mines des Etats-Unis.
- Des prospections aboutirent à la découverte des produits similaires naturels ou préparés à partir de produits naturels en Allemagne, en Russie, au Canada, en Grèce
- En Italie le docteur-ingénieur F. Savelli trouvait en 1934 un produit remarquable par sa pureté et sa blancheur dans les gîtes des Iles Ponza auxquels déjà ont succède d'autre gisement non moins dignes d'intérêt.
- En France des gisements étaient signalés en Dordogne et L'Afrique de Nord offrait à Lalla Marnia et à Camp-Berteaux d'excellent gîtes. d'autre part des possibilités intéressante sont aussi apparues en produits préparés similaires.
- Les études et les applications des lors se multiplièrent sur un rythme accélère.

2.4 Les gisements de bentonites

2.4.1 La bentonite du Wyoming

Dans le Wyoming était sis en pleines montagnes rocheuses et déjà célèbre par ces ressources minérales et par son parc national, que se situe Fort-Benton dans la région de Rock-Greed. Le géologue W.C Knight consacrait peut après la découverte une monographie déjà très complétée à l'argile de Fort-Benton et la dénommait du lieu d'origine : bentonite. La formation géologique portant également le nom de benton, qui renferme la bentonite se prolonge dans l'état voisin du Dakota du Sud. [Dérivé, 1951].

2.4.2 Gisements américains de bentonite Etats –Unis

Des gîtes de bentonite furent trouvés en divers autres points des territoires des Etats –Unis (gisements de désert de Mahava et de San-Bernardino, gisement de Pensylvanie et Virginie de l'ouest, gisement de la région de Wicksburg, gisement de beidellite de L'Illinois [Dérivé, 1951].

2.4.3 Canada

Au Canada il existe des gisements très importants de bentonite .toutes fois il ne semble pas que ceux-ci sauf peut être les gisements de Morden de Manitoba aient été exploité sur une grande échelle ni dans les proportions qui conviennent aux produits existants. Worcester a cependant montré les qualités décolorantes vis-à-vis des huiles de la bentonite brute de la région de Knollys. Les bentonites de Twelve Mile Lake sont très fortement colloïdale et leurs suspensions dans l'eau sont remarquables [Dérivé, 1951].

2.4.4 La bentonite Italienne

En 1935 les travaux de prospection menés par le DR Francesco Savelli amenèrent la découverte à L'île Ponza d'une très belle bentonite remarquable par sa blancheur [Dérivé, 1951].

2.4.5 Allemagne

Quelques gisements de bentonite existant en Allemagne .Le gisement le plus intéressant semble celui de Geisenheim ou comme divers autres points, il s'agit surtout de bentonite Ca (la base échangeable étant la chaux, alors que la base des bentonites américains et la soude) [Dérubéré, 1951].

2.4.6 Les gisements d'argiles bentoniques en Algérie

Ils sont exploités depuis plus de 50 ans dans la région de Maghnia et de M'Zila à Mostaganem. Après le traitement chimique, les produits sont utilisés dans les boues de forage et la décoloration d'huiles. Les autres utilisations après traitement mécanique seulement sont entre autres, fonderie, engrais, pesticides, génie civil, céramique.

Les ressources avérées globales des gisements dans la partie ouest de la société s'élèvent à 12.5 millions de tonnes. Les gisements évalués du district de Hammam Boughrara dans la région de Maghnia totalisent 11 million de tonnes dont 3.14 millions de tonnes pour le gisement de Roussel dans la région de Mostaganem, Le gisement de M'zila en exploitation renferme 1.1 millions de tonnes [BENTAL, 2011].

2.5 Contexte géologique du gisement en Algérie

Les bentonites sont fréquentes dans le sous-sol algérien. Certaines proviennent des cendres volcaniques comme celles de la vallée de la rivière du Chélif, alors que d'autres ont été formées par l'altération des roches rhyolites.

Les bentonites formées par les cendres volcaniques varient en épaisseur de 10 centimètres à environ 5 mètres. Elles représentent des sédiments crétacé et tertiaire avec des alternances pyroclastiques et des coulées de lave. Cette stratification complexe indique une variation dans l'homogénéité et la teneur en smectite. Certaines de ces bentonites possèdent une teneur élevée en smectite avec le sodium comme cation majeur.

Les bentonites d'âge Miocène sont également fréquentes sous la forme de couches de quelques centimètres d'épaisseur. Elles proviennent de cendres volcaniques.

2.6 Occurrence de la bentonite en Algérie

La bentonite est produite à partir de plusieurs bassins volcaniques du tertiaire à l'Ouest du pays, dans la région de Maghnia et de Mostaganem; ces gisements se trouvent à proximité de ports et sont tous accessibles par route ou par train. Le pays dispose d'un potentiel appréciable (Fig. II.29) pour développer l'industrie de la bentonite.

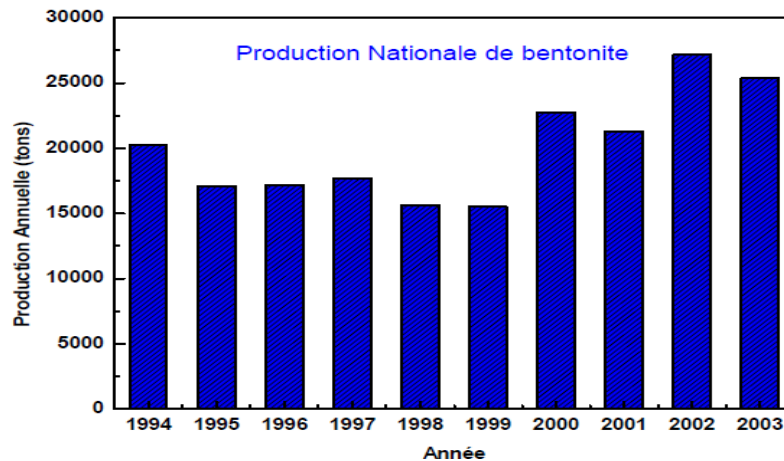


Fig. II.29 : Production nationale de bentonite [Kouloughli, 2007]

2.7 Variétés des bentonites

Il existe deux types de bentonites :

- **La bentonite à base de sodium** : qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau. Cette propriété est mise en valeur dans les mastics pour l'enfouissement de matières polluantes dans le sol. Elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique.
- **La bentonite à base de calcium** : qui ne possède pas ces propriétés de gonflement, a des applications parapharmaceutiques dont les résultats restent à prouver, notamment dans le domaine du système digestif. Des tribus indigènes d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Australie ont longtemps employé l'argile de bentonite pour cet usage.

2.8 Présentation du gisement de M'Zila (Mostaganem)

Le gisement se trouve à 40 Km au Nord–Est de Mostaganem. La superficie du gisement est de 369 Ha (Fig. II.30 et II.31).

Géologiquement, le gisement de M'Zila appartient au bassin sédimentaire du Cheliff. Ce dernier est composé de formations d'âges Miocène inférieur, Miocène supérieur, Pliocène et Quaternaire.

A l'échelle du gisement de M'Zila, la séquence du Miocène supérieur exposée dans la région des carrières, débute à la base par un banc épais de marne bleue compacte. Cette dernière est surmontée par les couches d'argile bentonitique, qui sont interstratifiées avec des grès biotitiques. Cette séquence est ensuite recouverte par une marne argileuse [BENTAL, 2011].

Quatorze couches d'argile bentonitique ont été reconnues dans le gisement de M'Zila et sont numérotées de la plus ancienne à la plus récente.

Ces couches sont plissées en une structure synclinale dont l'axe plonge vers l'ouest avec un angle de 25° . Sur le flanc nord de ce pli, les couches montrent une direction Est-Nord-Est et un pendage de 20 à 40° vers le sud, sauf la couche XIV qui possède un pendage plus abrupt (45°). Sur le flanc sud du synclinal, les couches adoptent une direction Nord-Est avec un pendage de 10 à 35° vers le Nord-Ouest [BENTAL, 2011].



Fig. II.30 : Situation du gisement par rapport à l'unité de Mostaganem



Fig. II.31 : Vue générale du Gisement de M'Zila Mostaganem

2.9 Domaine d'utilisation de la bentonite

La bentonite possède un large éventail d'utilisation dans les divers domaines tel que :

2.9.1 Produit céramique réfractaires et matériaux de construction : une des premières applications connues de la bentonite fut la confection de pâtes, et l'argile colloïde fut utilisée de prime abord comme matière céramique. Après divers tâtonnements et après avoir rencontré, comme toute chose nouvelle, une large force d'inertie des utilisateurs, la bentonite s'est peu à peu introduite dans cette industrie où elle est appelée à jouer en plusieurs circonstances un rôle particulièrement efficace et intéressant.

2.9.2 Emaux : grâce à son pouvoir émulsif et la faculté de transport des suspensions, la bentonite peut être utilisée avec profit dans les préparations liquides pour tenir en suspension les pigments et les ingrédients. L'industrie des émaux l'utilise à ce titre.

2.9.3 Ciments : dans les ciments, bétons, agglomères insonores, l'introduction de bentonite a un effet plastifiant très marquant et intéressant, d'autre part la bentonite s'oppose aux séparations en rendant les mortiers plus plastiques et plus imperméables, ainsi a-t-elle trouvé d'assez larges débouchés en cimenterie et dans l'industrie du béton d'aggloméré cellulaire, de ciments avec amiante, de bétons de ciments de pouzzolane.

Dans la confection de tours pour lavage chimique, par exemple, on utilise des ciments avec 2 à 5 % de bentonite. [Spence, 1924] a montré que l'addition de 1% de bentonite au ciment

portland accroît sa résistance mécanique et accélère sa prise. Des stucs de ciment portland ou de ciment magnésien ont ainsi été améliorés par additions de petites quantités de bentonite alcaline qui contribue en outre à l'hydrofugation mais ne doit pas être trop forte pour éviter de forts retraites. Des chercheurs japonais auraient établi que l'usage de teneurs en bentonite de 30 % par contre abaisserait la résistance et retarderait la prise.

2.9.4 Plâtre : dans les plâtres, la bentonite donne également un effet plastifiant et homogénéisateur et c'est utilisé largement dans la confection de moulages.

2.9.5 Revêtements imperméables : gâchée avec l'huile et avec ou sans matières complémentaires (ciment –chaux –charges.....) la bentonite peut être utilisée comme enduits et revêtements imperméables ou imperméabilisants.

2.9.6 Sable de moulage : les sables naturels de fonderie contiennent de l'argile qui assure le rôle de liant indispensable, mais qui diminue dans des proportions sensibles et avec un effet nuisible la porosité, aussi ces sables deviennent-ils rapidement inutilisables.

L'emploi de la bentonite, au contraire, permet d'obtenir l'effet liant avec faibles proportions d'agglomérant et en laissant au mélange une bonne porosité.

2.9.7 Matières plastiques : E. Hauser un technicien américain à l'institut technologique de Massachusells a réalisé des films plastiques et des matières comparables au mica à partir de la bentonite.

2.9.8 Industrie du caoutchouc et le latex: l'emploi de la bentonite comme charge a été retenue simultanément dans le caoutchouc et dans les préparations à la base de latex .dans ces applications, et principalement dans latex, la bentonite puise son intérêt dans le pouvoir absorbant et émulsif et surtout dans la finesse de ses particules et dans sa propriété de thixotropie. Elle peut aussi servir de succédané au talc pour le talquage d'objets en caoutchouc, de moules. C'est une charge dotée d'une finesse toute particulière, puisque de formation colloïdale. L'absorption d'eau pour former des gels se manifesta dans latex avec intensité. La bentonite épaisse en effet le latex jusqu'à l'état rigide, augmente l'adhérence et diminue la cohésion.

2.9.9 Papeterie : S.D.Wells avait proposé, dès 1923, les argiles colloïdales comme charge des papiers et précisait que la rétention était meilleure que celle du kaolin.

Reprenant l'ensemble des résultats de ses devanciers, Willet indiquait qu'un papier chargé à la bentonite avait moins de cendres qu'un papier chargé au titane, au kaolin ou au talc.

2.9.10 Savons : la bentonite constitue une charge pour les savons d'autant plus intéressante qu'elle peut participer elle-même soit par son pouvoir émulsif, soit par son affinité pour les particules carbonées, à l'effet détersif .il est possible d'aller ainsi jusqu'à des concentrations de 40% de bentonite dans les savons, ce qui, tout en donnant un bon produit, conduit à une évidente et sensible économie.

2.9.11 Produit d'entretien : les propriétés gélifiantes, émulsifiantes et liantes de la bentonite, ainsi que son pouvoir de disposition élevé et son haut pouvoir absorbant en font une matière première de grand intérêt pour l'industrie, d'ailleurs variée et complexe, des produits d'entretiens.

2.9.12 Sondages mines : l'emploi de la bentonite comme lubrifiant dans les perforations des roches et de terres renfermant des grains durs et des sables s'est avéré très intéressant et s'est rapidement développé. En outre la bentonite peut colmater de façon intéressante les trous de sondage.

2.9.13 Obturation des fuites : grâce à ses propriétés de gonflement la bentonite peut être utilisée pour obturer les fuites dans toutes canalisations. Des brevets ont même été pris pour couvrir de tel produit d'obturation.

2.9.14 Bentonite activée : la bentonite comme les terres décolorantes et sur les mêmes principes peut être activée. Elle prend alors outre ses propriétés un grand pouvoir décolorant et peut être utilisée notamment sous cette forme pour décoloration des huiles.

2.9.15 Conditionnement - géologie : le conditionnement du sol est intimement lié à sa teneur en argiles et à la nature de celles-ci la présence d'argile colloïdale accroît la plasticité et la viscosité du sol ainsi que son imperméabilité et sa tendance à sécher. L'emploi de la bentonite peut être envisagé pour le conditionnement de terres à construire. Bien que tous les sols argileux soient gélifs diminuent quand la proportion de la bentonite augmente dans un sol de fondation.

2.9.16 Autres applications : il existe autre application de bentonite avec les devers domaines tel que : Epuration et clarification des eaux, flottation de minerais, creusets réfractaires en graphite, combustibles agglomérés, émulsions asphaltites, extractions salines, isolants et électrotechnique, dispersions de graphites colloïdal, pâtes d'impression pour industrie textile, industrie du cuir, peinture à l'huiles et à l'eau, mastics, encres, crayons, colles et adhésifs, onguents, crèmes, pâtes, pommades et produits pharmaceutiques, crèmes de cosmétiques ,explosifs, industrie de sucres, traitement des mélasses ,médicament pour animaux, emploi alimentaires.

2.10 Propriété des bentonites

2.10.1 Propriétés physiques

2.10.1.1 Forme naturelle et finesse des particules

Sous sa forme brute naturelle, la bentonite est une roche tendre ayant à peu près la consistance du kaolin c'est-à-dire friable et onctueuse, happant fortement au linge, blanc ou légèrement teintée de jaune, de beige, de jaune verdâtre, de rose. Son grain est extrêmement fin.

2.10.1.2 Poids spécifique

Les poids spécifique à sec de la bentonite varie selon les quantités et origines dans de faibles proportions et va de 2.7 à 2.8.

Le poids spécifique apparent des produits broyés est sensiblement inférieur et de l'ordre de 1.6 à 1.8.

2.10.1.3 Gonflement

L'une des propriétés les plus remarquables de la bentonite est sa faculté de gonfler considérablement dans l'eau pour former des masses gélatineuses.

2.10.1.4 Viscosité

La viscosité est évidemment un caractère très important, scientifiquement et techniquement des gels et suspensions de bentonite.

2.10.1.5 Absorption et adsorption

En raison de la grande finesse des particules autrement dit de sa très grande surface utile de contact la bentonite est dotée d'un grand pouvoir absorbant.

Ross et Shannon, 1926 ont dit en parlant de la bentonite de Wyoming que cette heureuse combinaison de large surface et de texture perméable donne à la bentonite le plus grand pouvoir d'absorption que la nature semble avoir jamais conféré.

Scientifiquement l'adsorption dans les solutions colloïdales à grande surface de contact est un phénomène complexe rapporté à la fixation d'ions par les granules colloïdales joue un rôle important dans les phénomènes ultérieurs et particulièrement dans les variations de stabilité provoquées par l'adjonction de faibles quantités d'électrolytes dans la floculation.

2.10.2 Propriétés chimiques

2.10.2.1 Composition

Pour un produit du genre de la bentonite les essais physique et l'analyse minéralogiques présentent généralement un intérêt plus direct que l'analyse chimique .portant celle-ci permet de fixer les impuretés et les bases présentes.

Ainsi la teneur en fer permet dans certaine mesure d'exploiter la teinte des produits. Quant aux bases, elles jouent un rôle très important que nous aurons à étudier ultérieurement.

Les bentonites ont chimiquement, des teneurs qui permettent les rapporter à la montmorillonite : $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot HO \cdot nH_2O$

2.10.2.2 PH des suspensions

Alors les kaolins et la plupart des argiles ont des PH de leurs extraits légèrement acide par exemple PH =5 ou 6 les bentonites donnent un milieu légèrement alcalin lorsque l'on met ces terres à digérer dans de l'eau distillée ou non tamponnes.

2.11 Utilisation de la bentonite comme ajout dans le ciment

- D'après l'étude expérimentale qui effectuée par [Geryville et al. ,2011] ont montré que le traitement thermique à 800°C amélioré l'activité pouzzolanique de la bentonite.

- Quelque soit la nature de la bentonite, brute ou traitée (thermiquement ou hydrothermiquement), présente une grande activité pouzzolanique selon le test de Frattini (Fig. II.32) d'où cet essai est en corrélation avec l'essai de la chaux saturée (Fig. II.33).

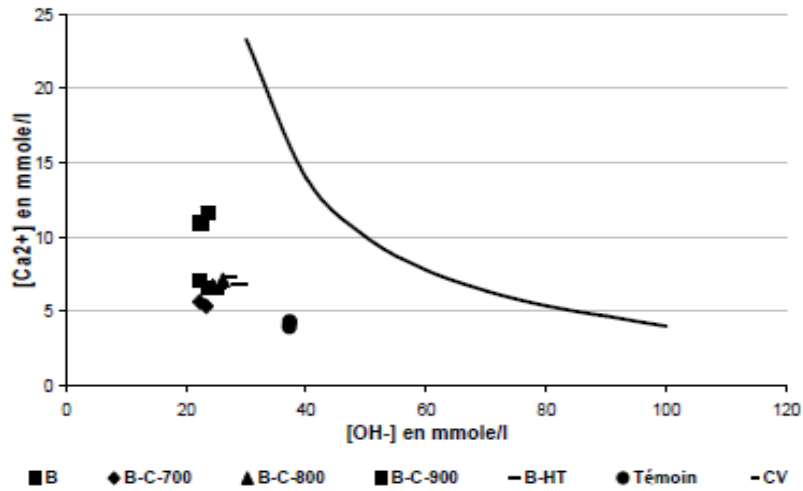


Fig. II.32: Résultats de l'essai de Frattini [Geryville et al., 2011]

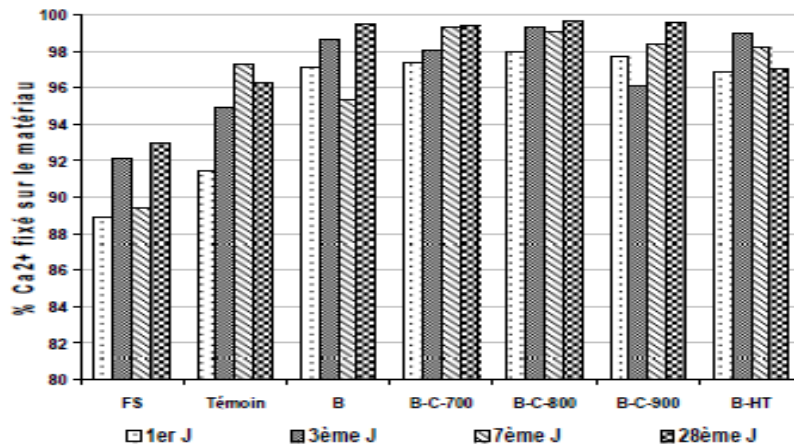


Fig. II.33 : Résultats de l'essai de chaux saturée [Geryville et al., 2011].

- L'indice d'activité de résistance (Fig. II.34), montre que la bentonite brute n'est pas réactive quelque soit l'âge, néanmoins, après traitement thermique, elle devient pouzzolanique.

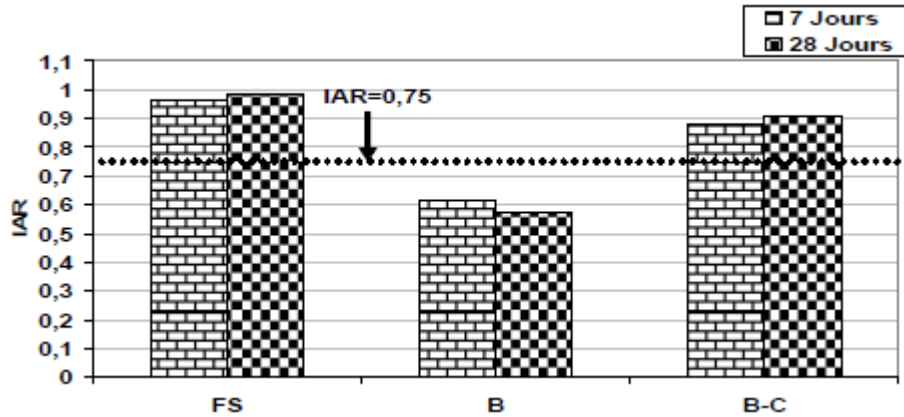


Fig. II.34 : Indice d'activités de résistances de la bentonite brute (B) et calcinée à 800°C (B-C) [Geryville et al. ,2011].

- [Mirza et al. ,2009] ont effectués des essais sur la bentonite pakistanaise calcinée (150 ° C, 250 ° C, 500 ° C à 750 ° C et 950 ° C), et ajoutée dans le ciment en tant que substitut partiel. Ils ont remarqué les conclusions suivantes :

1- l'indice d'activité des mortiers contenant de bentonite calcinée a "150 ° C " était légèrement supérieure à celle des mortiers contenant bentonite que le mélange de contrôle après 7 et 28 jours [Fig. II.35].

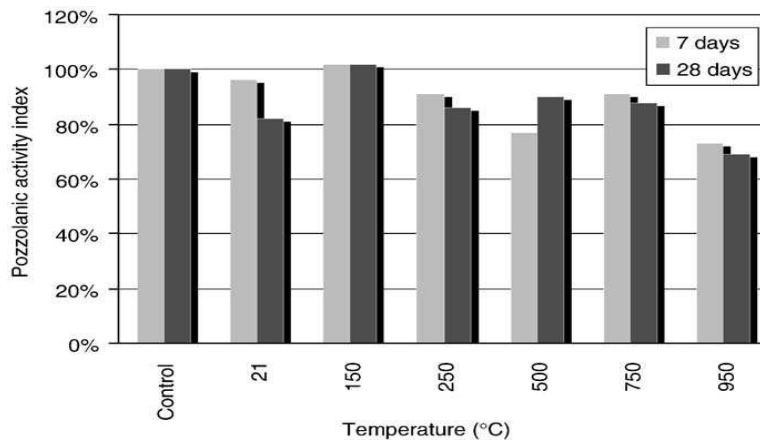


Fig. II.35: Variation de l'indice d'activité en fonction de température de calcination [Mirza et al. ,2009].

2- Mortiers contenant 25% et 30% de bentonite calcinée a " 150 ° C" ont montré des valeurs de résistance à la compression de 19,6 MPa et 20,9 MPa, respectivement, après 28 jours, ce qui démontre l'efficacité de ces mortiers en tant que matériau de construction à faible coût [Fig. II.36].

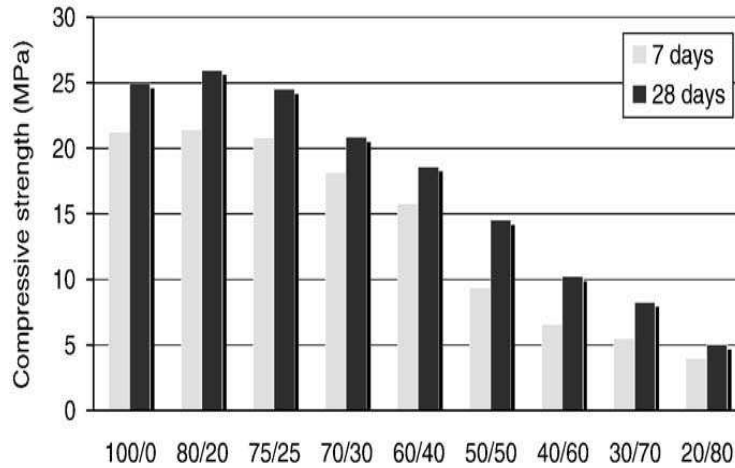


Fig. II.36 : Variation de la résistance des mortiers en fonction de la teneur de la bentonite calcinée (150 ° C) [Mirza et al. ,2009].

3- Les essais sur des cubes de mortier trempés dans les solutions 2% $MgSO_4$ et 5% de Na_2SO_4 ont démontré une amélioration constante de la résistance à l'attaque des sulfates que le contenu de la bentonite en eux a été augmenté.

4- La résistance à la compression du béton contenant de bentonite calcinée a "150 ° C ont diminué en fonction d'augmentation de substitution dans le ciment, après 7, 14, 28 et 56 jours. Cependant, le béton contenu 20 % et 25% de bentonite calcinée à 150 ° C" a montré des valeurs similaires de résistance à la compression après 28 jours (Fig. II.37).

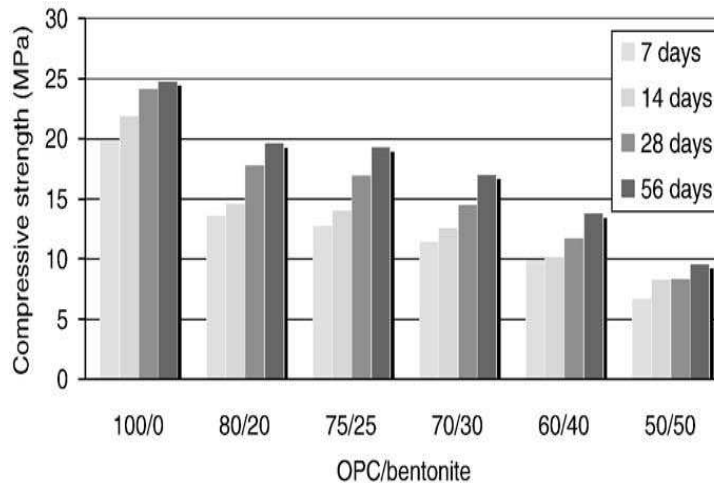


Fig. II.37 : Variation de la résistance des bétons en fonction de la teneur de la bentonite calcinée (150 ° C) et le temps [Mirza et al. ,2009]

- [Shazim et al. ,2012] a effectué des essais en remplacement partiel du ciment. La variable principale est la proportion de bentonite (3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18% et 21% en poids du ciment), a conclue que :

1- L'ouvrabilité, la densité et l'absorption d'eau du béton diminuent avec l'introduction de la bentonite à titre de remplacement du ciment. (Fig. II.38).

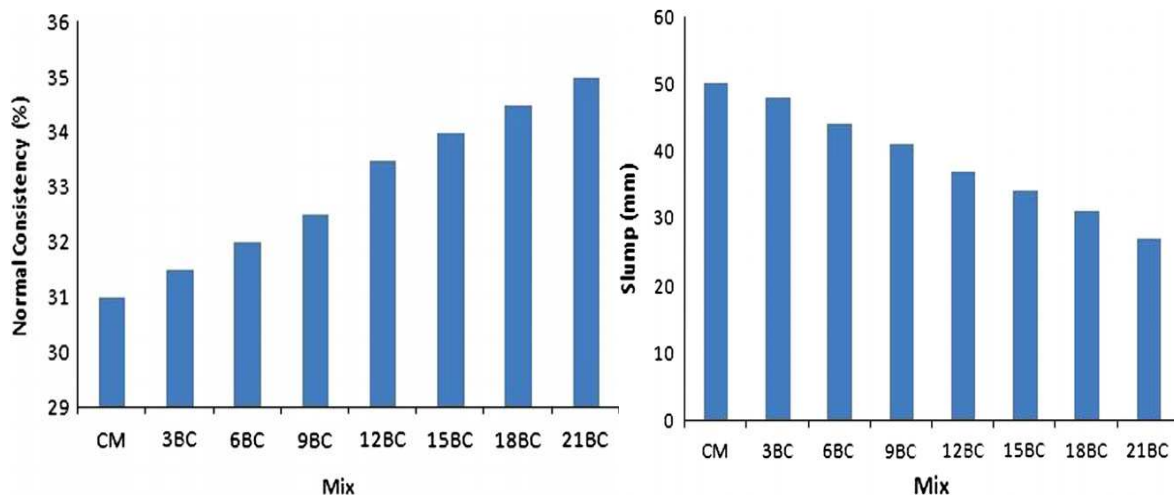


Fig. II.38 : Variation de la L'ouvrabilité, la densité de béton en fonction de la teneur de la bentonite [Shazim et al. ,2012]

2- L'analyse de la résistance à la compression du béton comparative a indiqué que, à 28 et 56 jours, les mélanges de bentonite et ciment ont montré une résistance plus élevée que CM. (Fig. II.39).

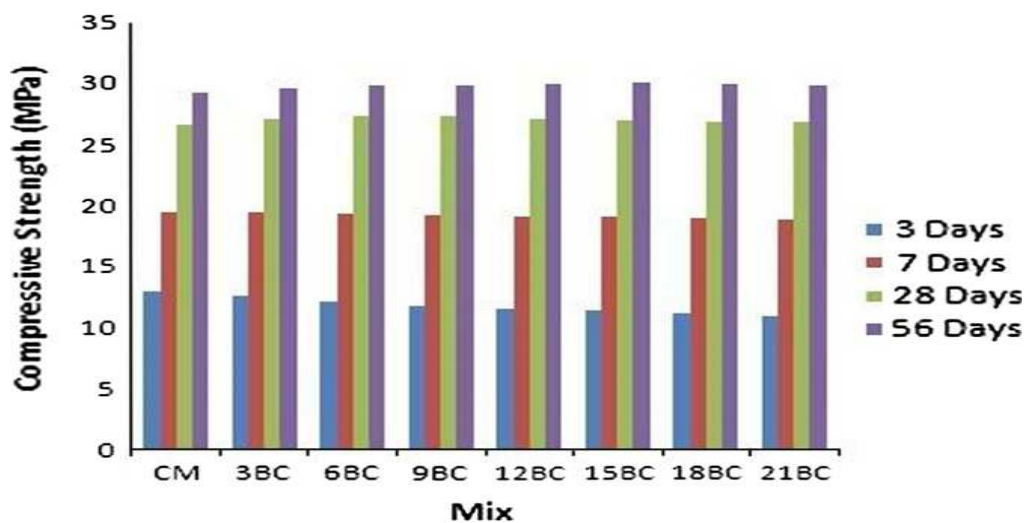


Fig. II.39 : Variation de la résistance des bétons en fonction de la teneur de la bentonite et le temps [Shazim et al. ,2012]

2.12 Conclusion

D'après les recherches bibliographiques, on peut conclure que la bentonite présente des propriétés particulières pour utiliser plusieurs domaines d'application et dans l'industrie de construction permet d'améliorer les propriétés rhéologiques et de structuration des produits

Chapitre II : Les ajouts minéraux et la bentonite

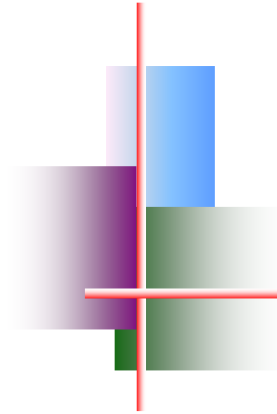
cimentaires en général et le béton en particulier. Compte tenu de l'évolution générale vers l'utilisation de produits à haute qualité environnementale, la bentonite peut être valorisée et utilisée en tant que matériaux de construction tout en respectant au mieux les ressources naturelles et l'environnement.

PARTIE II

ETUDE EXPÉRIMENTALE



CHAPITRE III
Matériaux et Méthodes



Chapitre III : Matériaux et Méthodes

1. INTRODUCTION

Cette partie présente l'étude expérimentale réalisée durant ce travail de thèse. Nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le plan expérimental afin d'étudier l'influence de bentonite calcinée sur les propriétés rhéologiques, mécaniques du mortier et du béton autoplacant. Ensuite, une étude de la durabilité est proposée pour les bétons autoplacants confectionnés à base de ciment Portland artificiel (C.P.A) comme béton témoin et avec les ajouts.

Les essais physiques, chimiques, minéralogiques, mécaniques et de durabilité ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de recherche L.C.T.P.E du département de Génie Civil de Mostaganem.
- Laboratoire de département de Génie Civil de l'universitaire Mustapha Stambouli de Mascara.
- Laboratoire physique et chimique de la cimenterie de Zahana.
- Laboratoire chimique de la cimenterie de Oggaz.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le programme expérimental a été défini en quatre phases majeures qui peuvent être schématisées comme présenté sur la Figure III.1.

- Une première étape consiste en une caractérisation des propriétés physico-chimiques des différents types matériaux utilisées.
- La seconde étape permet de définir l'influence de la bentonite calcinée sur la pâte du ciment et le mortier.
- La troisième étape consiste à étudier l'influence de bentonite calcinée sur les propriétés des bétons autoplacants.
- La dernière phase consiste à élaborer des essais sur la durabilité des bétons autoplacants.

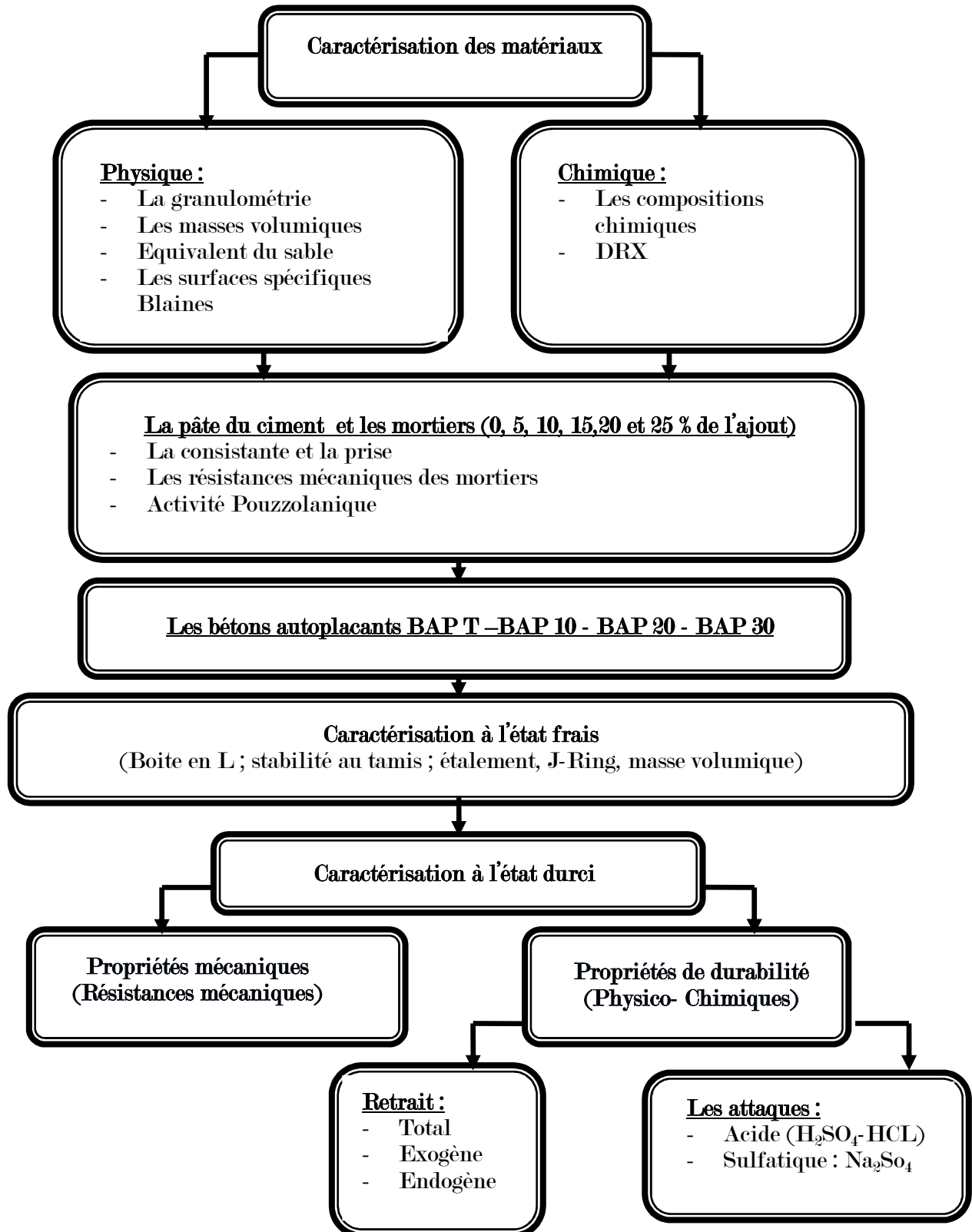


Fig. III.1: Programme expérimental

3. MATERIAUX UTILISES

3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%.

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO₂, que l'on écrit C₃S.
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO₂, que l'on écrit C₂S.
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al₂O₃, que l'on écrit C₃A .
- L'aluminoferrite tetracalcique, 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, que l'on écrit C₄AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs [Khelifa, 2002].

-Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland C.P.A –CEMI 42.5 provenant de la cimenterie de Zahana.

Les propriétés chimiques, physiques et minéralogiques du ciment sont résumées dans les Tableaux III.1 à III.3.

Tableau III.1: Composition chimique du ciment utilisé

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Perte au feu |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|--------------|
| CP | 20,66 | 3,62 | 6,32 | 64,61 | 1,56 | 1,49 | 0,30 | 0,18 | 1,43 |

Tableau III.2 : Composition minéralogique de clinker

| | C_3S | C_2S | C_3A | C_4AF | CaO.L |
|--------------------|--------|--------|--------|---------|-------|
| Teneur en % | 61 | 09 | 01 | 19 | < 01 |

Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5

| Caractéristiques | Résultat |
|--|-----------------|
| Masse volumique apparente (g/cm^3) | 3.13 |
| Rapport E/C | 0.237 |
| Surface spécifique Blaine (cm^2/g) | 3224 |
| Début de prise (min) | 135 |
| Fin de prise (min) | 221 |
| Temps de prise (min) | 86 |
| Résistance à la compression à 28 jours (Mpa) | 44.6 |

3.2 Les granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sables, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle selon la norme NF P 15-010, Octobre 1997.

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats avec un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé augmente lorsque le diamètre maximal des grains D_{max} augmente [FEBELCEM, 2005]. Ainsi, le D_{max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

- Afin de confectionner les bétons autoplaçants, un sable de mer de Sidi Lakhdar (Mostaganem), sable de carrière et deux fractions granulaires de graviers issus des carrières de

Chapitre III : Matériaux et Méthodes

Kristel (Oran) ont été utilisés. Leurs caractéristiques physiques et chimiques sont illustrées dans les Tableaux III.4 à III.7 et la Figure III.2. Pour la confection des mortiers, il est utilisé le sable normalisé (SABBIA NORMALE STANDARD SAND) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :1989.

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques de graviers (3/8)-(8/15)

| Caractéristiques | Graviers (3/8)-(8/15) |
|--|-----------------------|
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.66 |
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 1.45 |
| Pourcentage de fines (%) | 0.33 |
| Module de finesse | / |
| Absorption (%) | 0.55 |

Tableau III.5 : Analyse chimique gravier 3/8 et 8/15

| Constituants chimiques | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₄ | CL | Perte au feu |
|------------------------|------------------|-------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----|--------------|
| Les pourcentages | 2.06 | 54.58 | 0.14 | / | 0.13 | / | / | 43.32 |

Tableau III.6 : Caractéristiques physiques de sable de carrière, Sable de mer

| Caractéristiques | Sable de carrière | Sable de mer |
|--|-------------------|--------------|
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.56 | 2.68 |
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 1.48 | 1.51 |
| Equivalent de sable | Visuel | 87.76 |
| | Piston | 83.18 |
| Pourcentage de fines (%) | 0.67 | 0.96 |
| Module de finesse | 2.63 | 1.64 |
| Absorption (%) | 1 | 0.75 |

Tableau III.7: Analyse chimique du sable de carrière, Sable de mer

| Constituants chimiques | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₄ | CL | Perte au feu |
|------------------------|------------------|-------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----|--------------|
| Sable de carrière | 2.06 | 54.58 | 0.14 | / | 0.13 | / | / | 43.32 |
| Sable de mer | 75.05 | 10.34 | 0.25 | 0.95 | 2.67 | 0.065 | / | 1.26 |

Les courbes granulométriques du sable de mer, sable de carrière et des graviers (3/8) et (8/15) sont présentées dans la Figure III.2:

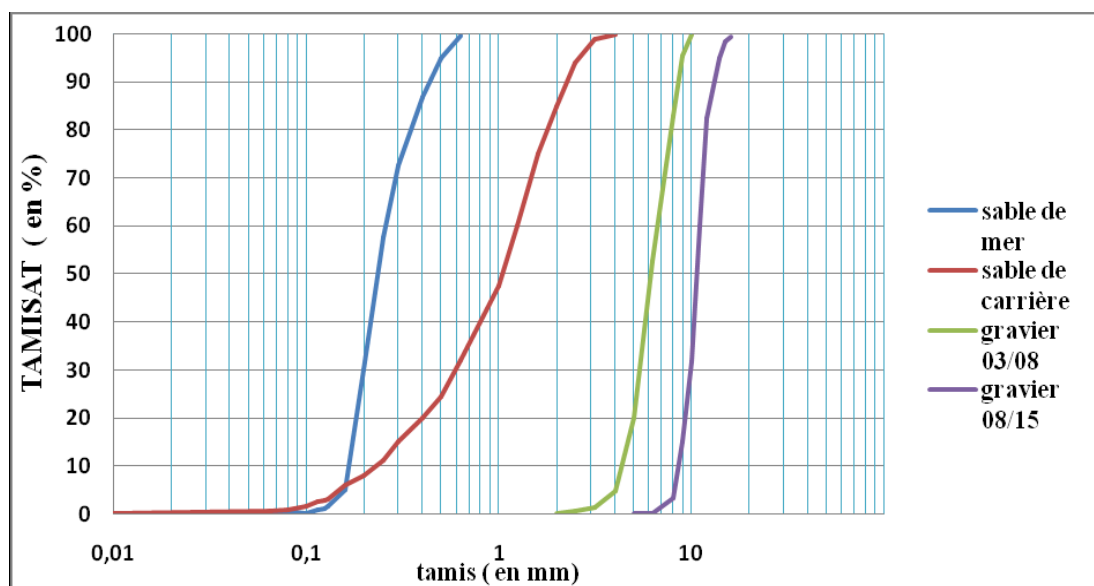


Fig. III.2 : Courbes granulométriques des granulats

3.4 La bentonite

3.4.1 Préparation de la bentonite calcinée

La bentonite utilisée a été prélevée dans le gisement de « M'zila », situé dans la wilaya de Mostaganem. Nous avons préparé une pouzzolane artificielle en suivant les étapes suivantes :

- Après séchage en étuve à 105°C la bentonite a été broyée et tamisées par voie sèche à travers la maille de 80µm (Fig. III.4)
- Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques, la vitesse de cuisson a été réglée à 7° par minute, la température de calcination de 800°C a été maintenue constante pendant 05 heures. Le choix de cette température de

calcination a été motivé par l'étude expérimentale effectuée par Geryville et al. ,2011. qui ont montré que le traitement thermique à 800°C a donné une meilleure activité pouzzolanique de ce matériau.

- Le produit (bentonite calcinée) ainsi obtenu (Fig. III.5) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité. Il a une surface spécifique Blaine de 3658 cm²/g et une densité de 2.547.



Fig. III.4 : Bentonite broyée et tamisée



Fig. III.5 : Bentonite calcinée

Après calcination de la bentonite, on a observé un changement de couleur des matériaux (Fig. III.4 et III.5), ce qui signifie un changement d'état de constitution, car l'évaporation de l'eau et le changement de certains minéraux détériore les mailles de ces minéraux [Zivica et al., 2015].

3.4.2 Granulométrie

La bentonite calcinée et le ciment ont été caractérisés par granulométrie laser. La Figure III.6 montre la distribution granulométrique du ciment et la bentonite calcinée.

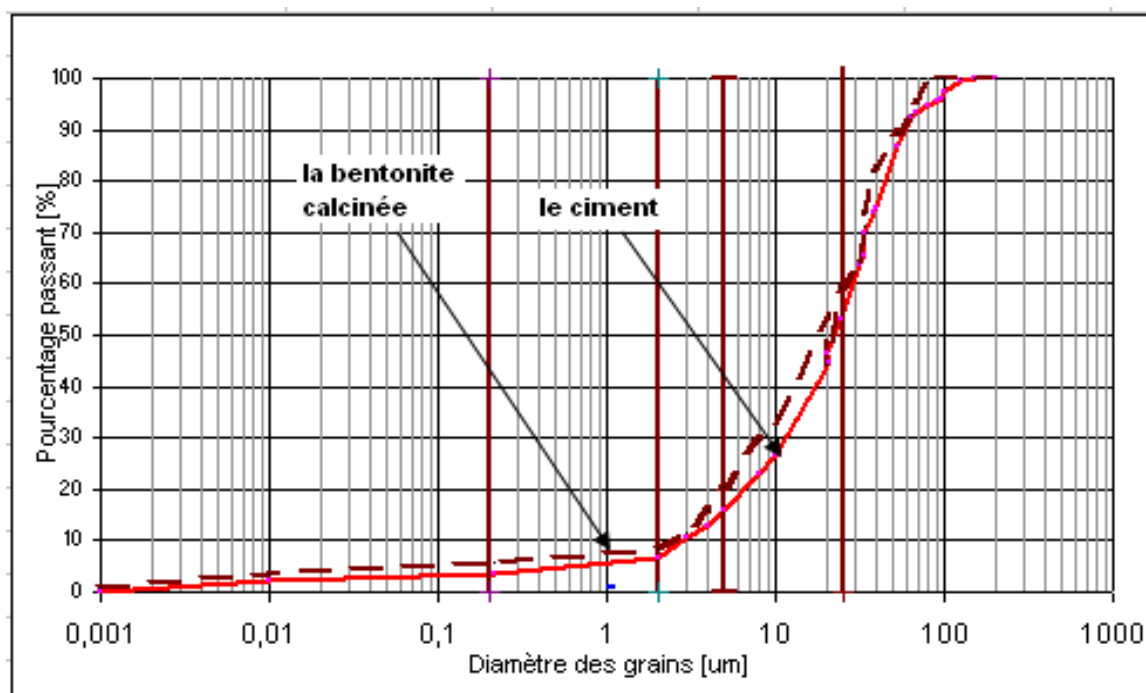


Fig. III.6 : Courbes granulométriques de bentonite calcinée et ciment.

3.4.3 Diffraction aux rayons X de la bentonite naturelle et calcinée

3.4.3.1 Principe de la diffraction aux rayons X sur poudre

La diffraction aux rayons X est la méthode la plus couramment utilisée pour se renseigner sur la structure cristalline. Dans le cas d'échantillons en poudres formées de très petits cristaux orientés aléatoirement, toutes les orientations possibles sont représentées, ce qui permet de faire une moyenne statistique.

L'identification est réalisée en comparant le diffractogramme obtenu avec une base de données internationale (JCPDS) contenant les diffractogrammes de référence de plus de 80000 phases. Cette méthode permet l'identification des différentes phases cristallines constitutives de l'échantillon et aussi d'estimer les proportions relatives de ces différentes phases.

Le réseau du cristal est une distribution régulière en trois dimensions des atomes dans l'espace. Ils sont arrangés pour former une série de plans parallèles, séparés par une distance d , qui varie selon la nature du matériau. L'interaction d'un faisceau de rayons X (longueur d'onde très courte) avec la matière donne naissance à une émission dans toutes les directions d'un rayonnement de même longueur d'onde et de phase cohérente. Ce phénomène de diffusion conduit à des ondes d'amplitude très faibles dans le cas d'un atome. En revanche, la diffusion par la matière sur un ensemble d'atomes, entraîne une interférence des ondes cohérentes

diffusées par chaque atome. Cette onde, dite diffractée, dépend de la structure atomique de la matière.

Lorsqu'un rayon X monochromatique de longueur d'onde λ est incident aux plans du réseau d'un cristal avec un angle θ , la diffraction a lieu seulement lorsque la distance parcourue par les rayons réfléchis de plans successifs, diffèrent d'un nombre entier de longueur d'onde. C'est la loi de Bragg (Fig. III.7) :

$$n \lambda = 2 d \sin \lambda \dots \dots \dots (3.1)$$

Où d est la distance interréticulaire séparant deux plans de même famille (h, k, l), n est l'ordre de diffraction.

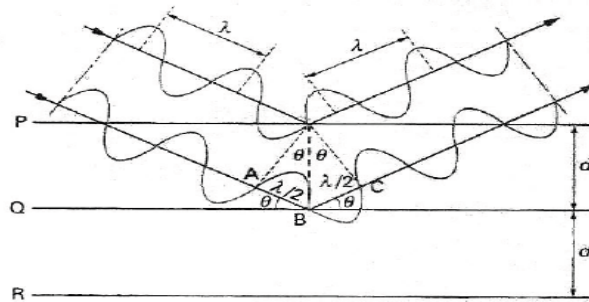


Fig. III.7: Géométrie expliquant la loi de Bragg par analogie à la réflexion

En changeant l'angle θ , les conditions de la loi de Bragg sont satisfaites pour différentes distances d .

En traçant les positions angulaires et les intensités des pics résultants de la diffraction, on obtient un diagramme qui est caractéristique de l'échantillon. Le diffractogramme est formé de l'addition des diagrammes individuels car il peut présenter un mélange de différentes phases.

L'enregistrement est fait en 2θ variant de 2° à 80° . La source de rayons X est fixe et lorsque le porte échantillon varie d'un angle θ , le détecteur varie d'un angle 2θ (Fig. III.8).

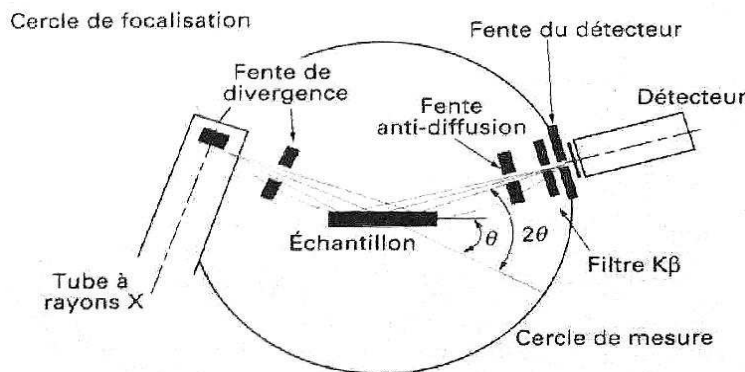


Fig. III.8: Schéma d'un diffractomètre

- L'analyse minéralogique par DRX de la bentonite naturelle et calcinée est montrée dans les Figures III.9 et III.10.

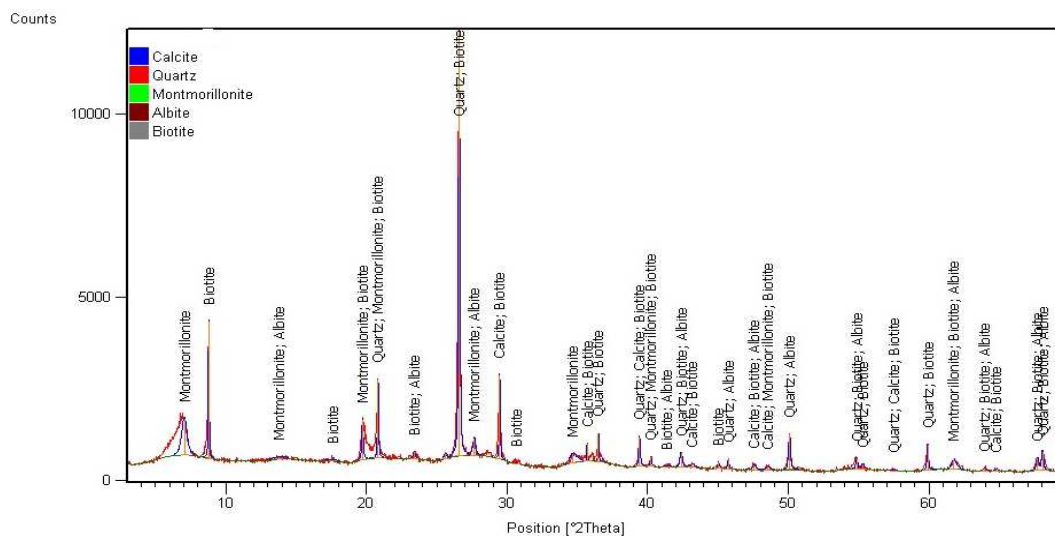


Fig. III.9: DRX pour la bentonite naturelle

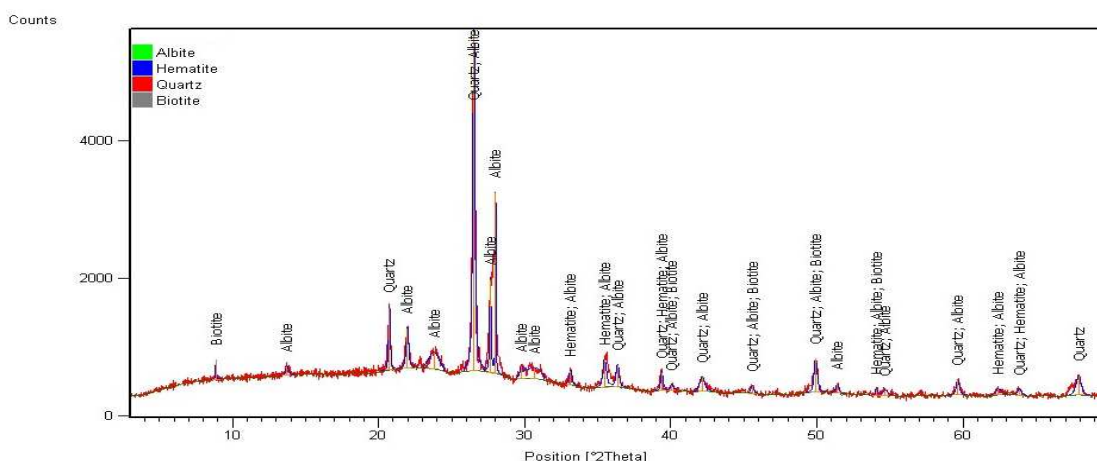


Fig. III.10: DRX pour la bentonite calcinée

On remarque dans la bentonite naturelle la présence des minéraux suivants : la Calcite, le Quartz, la Montmorillonite, l'Albite et la Biotite. Par contre, dans la bentonite calcinée, il est constaté la disparition de la Montmorillonite.

3.4.4 Compositions chimique et physique de la bentonite

Les analyses des compositions chimiques et physiques de la bentonite issue du gisement de M' Zila et la bentonite calcinée sont effectuées au laboratoire de la cimenterie de Oggaz.

Tableau III.8 : Composition chimique de la bentonite naturelle et calcinée

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Perte au feu |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|--------------|
| Bentonite naturelle | 63,45 | 11,85 | 4,8 | 3,16 | 2,58 | 0,21 | 1,24 | 1,18 | 0,098 |
| Bentonite calcinée | 66,72 | 14,07 | 6,53 | 3,33 | 2,69 | 0,21 | 1,24 | 1,2 | 0,095 |

Les analyses chimiques et minéralogiques de la bentonite étudiée ont révélé la présence des minéraux essentiels composants les liants hydrauliques courants tels que la silice et l'alumine.

Teneur en verre : La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour cela, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice-Chaux). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques centésimales de Tableau 8 :

$$\text{La teneur en verre (\%)} = \% \text{ silice} - \% \text{ chaux} = 66.72 - 3.33 = 63.39\% \text{ (ASTM 618)}$$

Cette différence est supérieure à 34%. Cela veut dire que notre pouzzolane est acide et contient une phase vitreuse, donc possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment.

Tableau III.9 : Caractéristiques physiques de la bentonite calcinée

| Caractéristiques | Valeur |
|--|--------|
| Surface spécifique Blaine (cm ² /g) | 3658 |
| Densité | 2.547 |

3.5 Adjuvant

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi.

3.6 Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes:

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (rapport eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants.

- L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable du réseau public.

3.7 Conclusion

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques des différents matériaux effectués dans les différents laboratoires donnent un aperçu général sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers et bétons autoplaçants qui seront étudiés en deuxième partie suivant du point de vue mécanique et durabilité.

4. LES METHODES

4.1 Introduction

Dans cette partie, il est développé un travail expérimental lié à la réalisation des essais sur les mortiers et les bétons autoplaçants. Pour chacun d'entre eux, nous décrirons le matériel et le protocole utilisé. Avant cela, nous allons présenter les paramètres de mise en œuvre des éprouvettes et présenter quelques remarques concernant leur confection.

4.2 Les essais sur la pâte de ciment et les mortiers

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout pouzzolanique (0%, 5%, 10%, 15%, 20 et 25%) dans le ciment par substitution partiel du ciment de la bentonite calcinée. Afin d'étudier l'effet de cet ajout, des essais ont été réalisés pour connaître les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné.

4.2.1 Caractéristiques physiques des pâtes de ciment

4.2.1.1 Détermination de la consistance normale

▪ **Objectif de l'essai :** La consistance normale de la pâte de ciment est déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat (Fig. III.12) selon la norme NF EN 196-3.

Le but de cet essai est de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage pour l'obtention d'un bon mortier.

▪ **Mode opératoire :** La procédure opératoire des essais est la suivante :

▪ **Malaxage de la pâte**

1. Peser 500 grammes de liant à un gramme près.
2. Prendre un volume d'eau à l'aide d'une éprouvette et l'introduire dans la cuve du malaxeur.
3. Ajouter soigneusement le ciment à l'eau pour éviter toute perte d'eau ou de ciment.
4. La durée de cette opération est de 5 à 10 secondes. Noter la fin de cette opération comme le temps zéro.
5. Mettre le malaxeur en marche immédiatement à vitesse lente pendant 90 secondes.
6. Au bout de ces 90 secondes, arrêter le malaxeur pendant 15 secondes durant lesquelles toute la pâte adhérant à la cuve du malaxeur doit être grattée et remise dans la gâchée.
7. Remettre alors la machine en route à vitesse lente pour une nouvelle durée de 90 secondes, le temps total de fonctionnement est de 3 minutes.

▪ **Remplissage du moule**

1. Introduire immédiatement la pâte dans le moule préalablement placé sur un support en verre, légèrement graissé et le remplir sans tassement ni vibration excessive.
2. Enlever l'excès par un mouvement de va et viens effectuer avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.

▪ **Essai de pénétration**

1. Régler l'appareil préalablement muni de la sonde.
2. Placer le moule et la plaque de base sur l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat.

3. Abaisser la sonde avec précaution jusqu'au contact de la pâte, observer une pause de 1 à 2 secondes.
4. Libérer alors les parties mobiles de la sonde (la sonde doit pénétrer verticalement au centre de la pâte). La libération de la sonde doit avoir lieu 4 minutes après l'instant zéro.
5. Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de pénétration ou 30 secondes après la libération.
6. La lecture doit être acceptée si elle est de 6 ± 1 millimètre du bord inférieur de la surface de la pâte.



Fig. III.12: Appareil de Vicat

4.2.1.2 Détermination du temps de prise

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat Automatique de la cimenterie de Zahana (Fig. III.13) muni d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3 à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Pour mesurer le temps de prise, il faut :

1. Placer le moule dans l'appareil de Vicat automatique pour connaître le début et la fin de prise du ciment.
2. Le temps de début de prise correspond à la lecture de 4 ± 1 millimètres du fond du moule, noté à partir du temps 0.
3. Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 millimètres de la surface du moule, noté à partir du temps zéro.



Fig. III.13: Appareil de Vicat Automatique pour la détermination des temps de prise.

4.2.1.2 Composition chimique des mélanges

Les essais de composition des mélanges ont été effectués au niveau du laboratoire de département de chimie de la cimenterie de Oggaz.

4.2.2 Les essais sur le mortier

4.2.2.1 Formulation des mortiers

Nous utiliserons des mortiers normaux, dont la composition est la suivante :

Tableau 7. Compositions des mortiers

| Constituants | Sans ajout | Avec ajout | | | | |
|------------------------|------------|------------|------|--------|------|--------|
| | | 05% | 10% | 15% | 20% | 25% |
| Ciment (g) | 450 | 427.50 | 405 | 382.50 | 360 | 337.50 |
| Bentonite calcinée (g) | 0 | 22.50 | 45 | 67.50 | 90 | 112.50 |
| Sable normalisé (g) | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 |
| Eau (g) | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 |

4.2.2.1 Confection des mortiers

Pour les mortiers, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 L. La pale de malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence du malaxage est conforme à la norme EN 196-1. Ce malaxage se fait comme suit:

1. On introduit l'eau en premier dans le malaxeur et on verse ensuite le ciment.
2. Aussitôt après, on met le malaxeur en marche à vitesse lente.
3. Après 30 s de malaxage, on introduit régulièrement le sable normalisé pendant les 30 s suivantes.
4. On met alors le malaxeur à sa vitesse rapide et on continue le malaxage pendant 30 s supplémentaires.
5. On arrête le malaxeur pendant 1 min et 30 s. Durant les 15 premières secondes, on enlève au moyen d'une raclette de caoutchouc le mélange adhérant aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
6. On reprend ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
7. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

4.2.2.2 Essais Mécaniques

- **Procédure d'essai:** Les échantillons d'essais ont été confectionnés à la cimenterie de Zahana conformément à la Norme ENV 197-1 dans des moules prismatiques 40 x 40 x 160 mm³ (Fig. III.14 et III.16) et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc (Fig. III.15). Une fois arasés, les moules contenant les échantillons sont couverts de film en plastique et stockés dans le chambre humide sous une température de $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative d'environ $55 \pm 5\%$ (Fig. III.17) Le démoulage est effectué après une durée de 24h et les échantillons sont conservés Les éprouvettes sont conservées dans le chambre humide (sous l'eau) jusqu'à la date prévue de l'essai.



Fig. III.14 : Moule pour éprouvettes de mortiers



Fig. III.15 : Table de Choc



Fig. III.16 : Echantillons des mortiers confectionnés



Fig. III.17 : Chambres d'humidité

-Il est à noter que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances de : 2, 7, 28, 60, 90 et 180 jours. La mesure des résistances mécaniques est effectuée sur une presse hydraulique (Fig. III.18).



Fig. III.18: Appareil essai de flexion et compression

a. Résistance à la traction par flexion

Le système est pourvue d'un dispositif de flexion par trois points tels que schématisés sur la Fig. III.19.

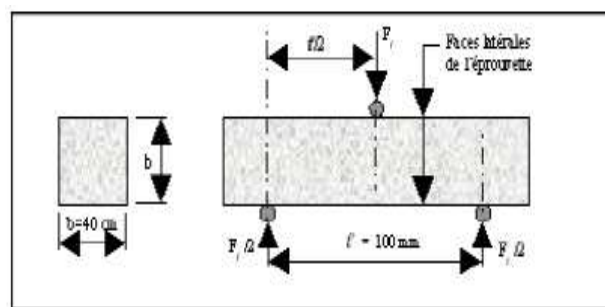


Fig. III.19: Dispositif de flexion par trois points

La résistance à la traction R_f est calculée selon la formule :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (3.2)$$

Où

F_f : la charge de rupture de l'éprouvette en flexion.

b : côté de la section carrée du prisme.

l : la distance entre les appuis.

b. La résistance à la compression

Les demi-prismes obtenus après la rupture par flexion de l'éprouvette ont été rompus par compression au moyen d'une presse d'écrasement (Fig. III.20). La résistance à la compression R_c est calculée selon la formule :

$$R_c = F_c / S \quad (3.2)$$

Où

F_c : la charge de rupture.

S : la surface de du prisme.

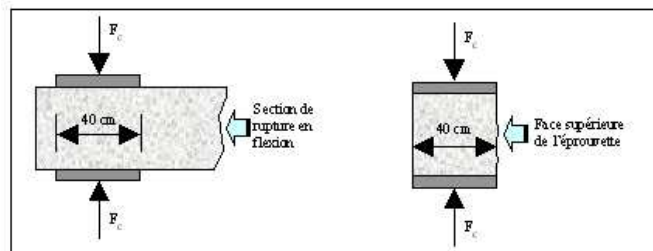


Fig. III.20: Dispositif de compression

4.3 Les essais sur le béton autoplaçant

Dans notre étude quatre (04) bétons autoplaçants ont été élaborés (BAPT, BAP10, BAP20, BAP30) pour avoir l'effet de la bentonite calcinée comme ajout dans le ciment sur leur comportement à l'état frais et durcis, avec BAPT représente le béton témoin ; BAPX est un béton avec X % de bentonite calcinée.

4.3.1 Compositions des bétons

La formulation des bétons autoplaçants utilisés est basée sur la méthode de volume de pâte. La fixation d'un volume de pâte est de l'ordre de 375 l/m^3 , $E/L = 0.5$ et G/S proche de 1 (Bouhamou, 2008).

Pour la formulation des bétons autoplaçants, le dosage en eau ne s'exprimera plus par le rapport E/C mais par le rapport E/L, L étant le liant hydraulique équivalent.

$$L = C+kA \text{ (EN 206-1-2015)}$$

où C = dosage en ciment.

A = dosage en additions.

et k = indice (ou coefficient) d'activité hydraulique des additions.

Les compositions sont indiquées dans le Tableau III.8 :

Tableau III.8 : Compositions des mélanges

| Composition (kg/m ³) | BAPT | BAP10 | BAP20 | BAP30 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Sable de mer | 570 | 570 | 570 | 570 |
| Sable de carrière | 251 | 251 | 251 | 251 |
| Gravier 3/8 | 333 | 333 | 333 | 333 |
| Gravier 8/15 | 499 | 499 | 499 | 499 |
| Ciment | 447.39 | 418.00 | 385.00 | 353.82 |
| Bentonite calcinée | / | 36.40 | 72.81 | 109.21 |
| Eau de gâchage | 224 | 218 | 213 | 208 |
| Superplastifiant | 8.55 | 9.10 | 9.9 | 10.20 |
| Volume de pâte (l/m ³) | 375 | 375 | 375 | 375 |

Où BAPT représente le béton témoin ; BAPX est le béton avec X % de bentonite calcinée substituée au ciment.

4.3.2 Confection des bétons

Afin d'assurer un mélange homogène, dont la répartition de différents constituants de nos bétons est plus régulière, nous avons choisi d'effectuer nos travaux au laboratoire dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 100 l (Fig. III.21). La séquence d'introduction des différents matériaux est faite comme suit :

1. On verse d'abord le sable dans le malaxeur pour l'homogénéiser pendant environ 30 s.
2. On ajoute le liant (ciment seulement ou ciment et addition minérale) et on malaxe pendant 1 min.
3. On additionne les gravillons et on malaxe à sec durant 1 min.

4. On introduit ensuite les trois quarts de la quantité d'eau et l'agent colloïdal, s'il est utilisé et on malaxe pendant 2 min.
5. On ajoute, au fur et à mesure, le reste de l'eau et de superplastifiant et on malaxe durant 2 min environ jusqu'à l'homogénéisation de l'ensemble.
6. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.



Fig. III.21 : Malaxeur

4.3.3 Les essais du béton à l'état frais

La caractérisation à l'état frais des bétons autoplaçants s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC, 2008: étalement au cône, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis et J-ring.

4.3.3.1 Essai d'étalement

a. But

L'essai d'étalement au cône permet de mesurer la consistance d'un béton.

b. Appareillage

- **Table d'étalement** : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton.
- Le plateau de la table d'étalement doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable, d'une épaisseur minimale de 2 mm, non attaquable par la pâte de ciment. Le plateau doit être conçu de façon à éviter toute déformation de la plaque en inox.
- Le centre de la table doit être marqué de deux cercles concentriques centrés de (210 ± 1) mm et de (500 ± 1) mm de diamètre.

- **Cône d'Abrams** : moule en métal non directement attaqué par la pâte de ciment, d'une épaisseur min. de 1,5 mm.
- La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités telles que des protubérances de rivets et sans déformations locales. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :
 - diamètre de la base : (200 ± 2) mm ;
 - diamètre du haut : (100 ± 2) mm ;
 - hauteur : (300 ± 2) mm.

Les deux extrémités sont ouvertes, parallèles, et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du cône. Le moule doit être suffisamment lourd ou muni, à sa partie inférieure, de pattes d'appui afin de le rendre immobile durant le remplissage.

- Entonnoir, en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abrams spécifié ci-dessus.
- Règle, graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.
- Seau d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bac verseur.
- Truelle.
- Chiffon humide.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Main-écope.
- Niveau.

c. Mode opératoire

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque ainsi que le cône d'Abrams (éliminer l'eau en excès avec le chiffon humide, il y a lieu de ne plus avoir d'eau libre en surface de la plaque et du moule).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, l'échantillon global doit être ré-homogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Equiper la partie supérieure du cône de l'entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, à l'aide du seau, jusqu'à l'arase supérieure du cône (Fig. III.22 (a)).

- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement.
- L'enlèvement du moule doit se faire, par une remontée verticale régulière sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion, en maximum 5 s. Maintenir le moule au-dessus du béton minimum 10 s et à une hauteur (par rapport à la base du moule) de maximum 30 cm.
- L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 s.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer (au centimètre le plus proche) l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires (Fig. III.22 (b)). Noter ces deux valeurs D1 et D2.
- Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être rejeté et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.
- On peut également chronométrer la valeur du T_{50} (temps nécessaire après soulèvement du cône pour que le béton atteigne le cercle de 50 cm).
- Après mesure de l'étalement, un contrôle visuel de la galette de béton peut aussi s'avérer intéressant. En effet, les gros granulats doivent être apparents à la surface du mélange et être uniformément répartis. De plus, sur le pourtour de la galette, il ne peut y avoir une auréole de laitance.



(a)



(b)

Fig. III.22: Essai d'étalement

4.3.3.2 Essai de boîte en L

a. But

L'essai de la boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage et la ségrégation dynamique.

b. Appareillage

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- Boîte en L.
- Un mètre.
- Un niveau à bulle.
- Un chronomètre.

c. Mode opératoire

Le protocole de mesure adopté est le suivant :

- Treize litres de béton sont mis dans la partie verticale de la boîte en L
- Puis on laisse le béton se reposer pendant une minute.
- La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.
- A la fin de l'écoulement, on mesure h_1 et h_2 et on calcule le rapport (h_2/h_1) exprimé en pourcentage le résultat exprimé en termes de taux de remplissage.
- Le béton est qualifié d'autoplaçant si son de taux de remplissage dépasse les 80% si non la composition doit être revue.

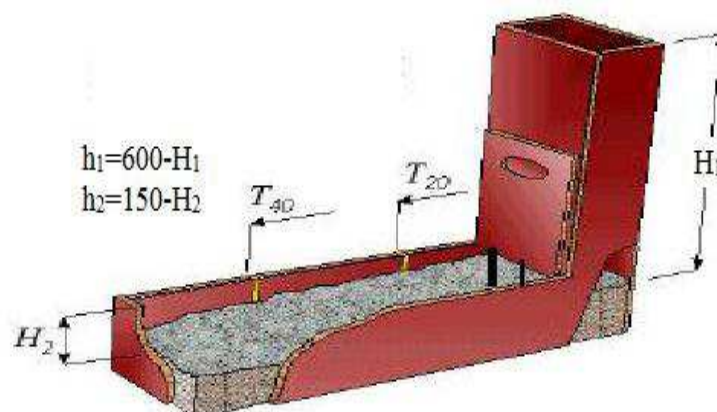


Fig. III.23 : Essai de boîte en L

4.3.3.3 Essai de stabilité au tamis

a. But

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation.

b. Appareillage

- Seau de 10 l muni d'un bec verseur + couvercle.
- Tamis (toile à mailles carrées) 5 mm de diamètre + fond.
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Main-écope.

c. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton représentatif
- Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. Le seau doit être rempli à raison d'au minimum 9 litres de béton. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, l'échantillon global doit être ré-homogénéisé à la main-écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 minutes.
- Peser le fond seul : P_{fond}
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes.
- Verser sur le tamis une quantité de béton égale à $(4,8 \pm 0,2)$ kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$.
- Noter immédiatement la masse réelle de l'échantillon de béton versé sur le tamis (Fig. III.24 (a)): $P_{\text{échantillon}}$
- Attendre 2 minutes.
- Retirer le tamis ainsi que le fond et remettre la balance à zéro.
- Peser le fond avec la laitance (Fig. III.21 (b)): $P_{\text{fond}} + \text{laitance}$
- Déterminer : $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$

Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon :

$$= (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \times 100$$

Le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.

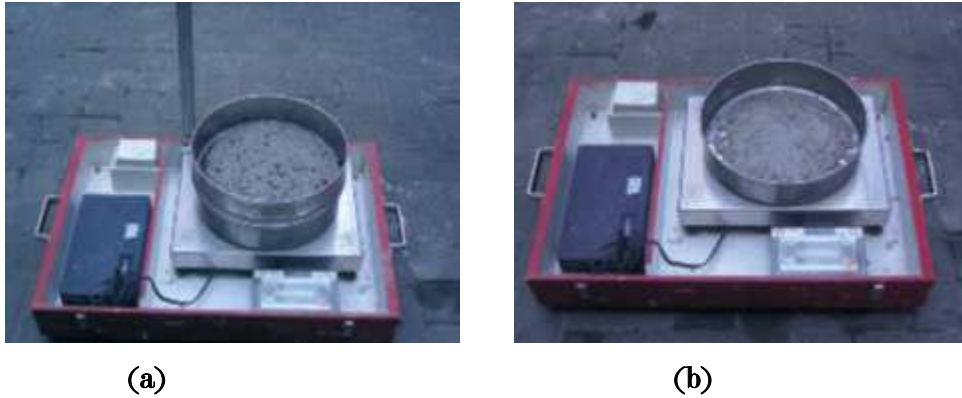


Fig. III.24 : Essai de stabilité au tamis

4.3.3.4 Essai de J-Ring

a. But

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu frottement ferrailé.

b. Appareillage

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est le même que d'étalement, en ajoutant un anneau équipé de barres en acier.

c. Mode opératoire

- placer le cône d'Abrams au centre du plateau métallique entouré du J-Ring, puis de remplir une quantité représentative de béton.
- ensuite soulever le cône puis mesurer l'étalement obtenu ainsi que les hauteurs de bétons situés au centre du plateau (h_1) l'intérieur avant les barres (h_{ai}) et à l'extérieur (h_{ri}) après les barres du J-Ring (Fig. III.25).
- on détermine h_m et h_r ; pour vérifier la relation : $2h_r - h_m < 15$ mm.

Tel que :

- $h_m = \Sigma (h_r - h_{ai}) / 4$
- $h_r = \Sigma (h_{ai} - h_{ri}) / 4$



Fig. III.25 : Essai de J-Ring

4.3.4 Essais sur bétons durcis

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés, sont des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 (Fig. III.26). Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance déterminée (3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 et 360 jours).



Fig. III.26 : Confection des éprouvettes cubique en béton autoplaçant

4.3.4.1 Les essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10$ cm^3 conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (Fig. III.27). La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.



Fig. III.27 : Presse des éprouvettes du béton.

4.3.4.2 Essais de Durabilité

L'objectif de cette étude est de connaître le comportement des bétons autoplaçants face aux attaques sulfatiques, acides, carbonatation ainsi que l'étude du retrait. Pour les essais de durabilité, on a sélectionné les quatre bétons suivants : BAPT, BAP10, BAP20, BAP30.

a. Attaque des bétons autoplaçants par les acides : Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes cylindriques des bétons autoplaçants de 63 mm de diamètre et de 126 mm de hauteur ont été confectionnées selon la Norme NF EN 196-1 Démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à 90 jours (Fig. III.28).



Fig. III.28 : Eprouvettes conservées dans l'eau saturée en chaux

Chapitre III : Matériaux et Méthodes

▪ Après 90 jours de cure sous l'eau saturée en chaux, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans les différentes solutions suivantes (Fig. III.29) :

- 2% d'acide sulfurique (H_2SO_4) (Fig. III.29).
- 2% d'acide chlorhydrique (HCL) (Fig. III.30).



Fig. III.29 : Acide chlorhydrique HCL

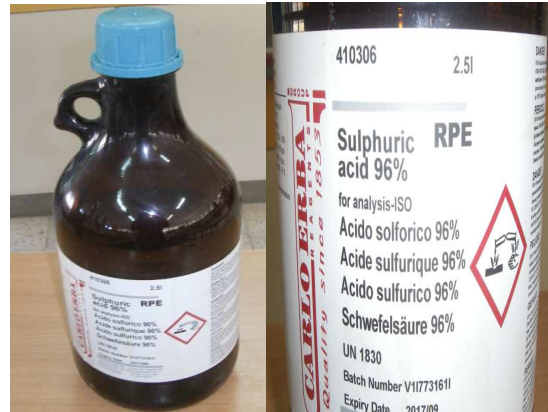


Fig. III.30 : Acide sulfurique H_2SO_4



Fig. III.31: Eprouvettes de bétons immergés dans les attaques acides

Les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau douce pour éliminer le béton altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.01g (Fig. III.32).

- Un papier pH a été utilisé pour contrôler les niveaux du pH tous les deux jours. Le pH maximum mesuré est de 2,0 pour le (H_2SO_4) et de 5,0 pour le (HCL).
- Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100 \quad (3.3)$$

Avec :

- M_1 : masse des éprouvettes avant immersion.
 - M_2 : masse des éprouvettes après immersion.
- Une comparaison a été faite visuellement à partir de photos numériques entre l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide.



Fig. III.32 : Pesée des éprouvettes

b. Attaque des bétons autoplaçants par le sulfate : Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes cubiques des bétons autoplaçants $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ont été confectionnées .Démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à 90 jours (Fig. III.26). Après 90 jours de cure sous l'eau saturée en chaux, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans 2% de sulfate de sodium (Na_2SO_4). (Fig. III.33 et III.34) :



Fig. III.33 : Sulfate de sodium (Na_2SO_4).



Fig. III.34: Eprouvettes de bétons immergés dans les solutions sulfatiques

- Les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau douce pour éliminer le béton altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.01g Cette opération est effectuée à 1 l'immersion dans la solution.
- Selon la norme ASTM C1012-04, le pH de la solution de sulfate doit être compris entre 6 et 8 et la solution doit être renouvelée chaque semaine, ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium. Pour cela, nous avons adopté la méthode de [Mehta .1975] qui recommande la correction de la solution déjà utilisée, par l'ajout d'une quantité d'acide sulfurique (0,1 N H₂SO₄) jusqu'à l'obtention du pH de la solution de départ (entre 6 et 8). La correction est réalisée quotidiennement au cours des premières semaines d'essai, ensuite elle devient hebdomadaire. Les solutions sont renouvelées chaque mois.
- Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100 \quad (3.3)$$

Avec :

- M₁ : masse des éprouvettes avant immersion.
- M₂ : masse des éprouvettes après immersion.
- Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm³. Trois échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant une presse d'une capacité maximale de 3000 kN. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire.
- Les échéances prévues pour les échantillons immergés dans la solution sulfatique sont 28, 90, 180, 360, et 400 jours.

▪ Pour évaluer la dégradation de chaque béton, une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) avant et après 360 jours de conservation dans le milieu sulfatique.

c. Carbonatation naturelle : La carbonatation résulte de l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur le béton, et affecte la durabilité des structures en béton, car elle peut entraîner la corrosion des armatures

La teneur en CO_2 de l'air ambiant .C'est dans ces conditions que se produit la carbonatation naturelle. Pour mesure la profondeur de carbonatation naturelle nous avons utilisée trois éprouvettes ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) ont été confectionnées pour chaque formulation. Les éprouvettes ont été placées à l'air libre au laboratoire pour suivre l'évolution de la carbonatation naturelle. L'échéance de mesure pour cette ambiance de conservation est de 13 mois. La valeur de l'épaisseur de carbonatation correspondant à une échéance donnée est la moyenne des mesures effectuées sur les quatre faces de l'échantillon.

d. Mesure du retrait: Dans cette partie de travail expérimental, nous avons choisi d'effectuer l'étude de retrait sur des bétons autoplaçants. Où nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$), selon la norme NFP 15 -433. Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité (Fig. III.35) Après 24h de cure, les éprouvettes ont été démoulées puis conservées dans une chambre (20C° - HR=55%) et pour les mesures les éprouvettes placées verticalement dans le déformètre, qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon (Fig. III.36). Les éprouvettes utilisées pour les mesures de déformations différées étaient au nombre de 6 pour chaque type d'essais. Trois étaient conservées en mode endogène, isolée donc du milieu extérieur par une double couche de papier d'aluminium auto-collant étanche et les trois autres étaient conservées en dessiccation. Chaque mesure est la moyenne de trois valeurs obtenues sur trois éprouvettes.



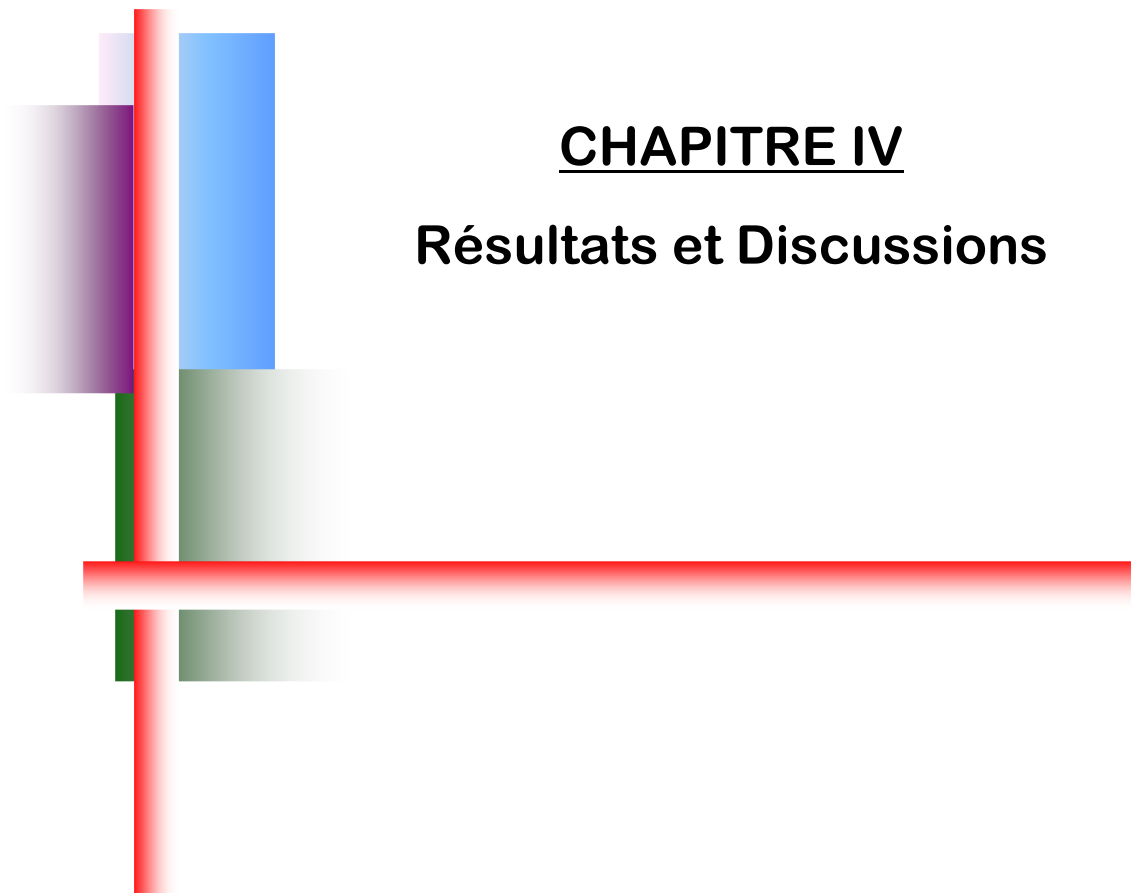
Fig. III.35: Eprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) équipées de plots



Fig. III.36 : Mesure du retrait

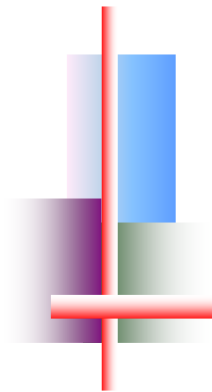
4.4 Conclusion

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble du travail expérimental concernant la caractérisation de la pâte de ciment et le mortier sans et avec la bentonite calcinée, qui avait abouti sur la faisabilité de leur valorisation dans les bétons autoplaçants comme ajouts dans la matrice cimentaire. En nous plaçant dans ce scénario de valorisation, une étude de formulation basée sur six (6) liants différents (0, 5, 10, 15, 20 et 25% d'ajout de bentonite calcinée) pour la confection des mortiers (La résistance mécanique, l'activité pouzzolanique), ainsi quatre (4) formulation pour les bétons autoplaçants (à l'état frais : la boîte en L, la stabilité au tamis, la laitance, J-Ring et à l'état durci : la résistance à la compression et la durabilité).



CHAPITRE IV

Résultats et Discussions



Chapitre IV : Résultats et discussions

1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats et discussions de la valorisation de la bentonite calcinée pour formulation des liants hydrauliques en substitution partielle au ciment en tant que pouzzolane de synthèse rentrant dans la composition d'un BAP. Il s'agit d'étudier l'influence de cette bentonite calcinée sur les caractéristiques physico-mécaniques et sur la durabilité de ce béton autoplaçant.

2. LES LIANTS ET LES MORTIERS

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudions successivement les effets des additions (La bentonite calcinée) sur les liants, la prise, la consistance du pâte du ciment et les résistances mécaniques des mortiers.

2.1 Les liants

2.1.1. Les surfaces spécifiques Blaine des différents mélanges

La finesse Blaine est principalement utilisée par les cimentiers pour estimer la surface spécifique d'une poudre. Cette technique est basée sur la perméabilité d'un échantillon compacté. La méthode consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un volume d'air précis à travers un lit de poudre compacté. La finesse est ensuite calculée à partir de la mesure réalisée sur un échantillon de référence.

Les surfaces spécifiques Blaine des différents mélanges sont indiquées dans le Tableau IV .1 et la Figure IV.1 .Il est observée que la finesse des liants augmente avec la teneur en bentonite.

Tableau IV.1 : Surfaces spécifiques Blaine des différents mélanges

| | Bentonite calcinée | CP | BC05 | BC10 | BC15 | BC20 | BC25 |
|------------------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| Finesse (cm^2/g) | 3658 | 3224 | 3366 | 3386 | 3396 | 3420 | 3478 |

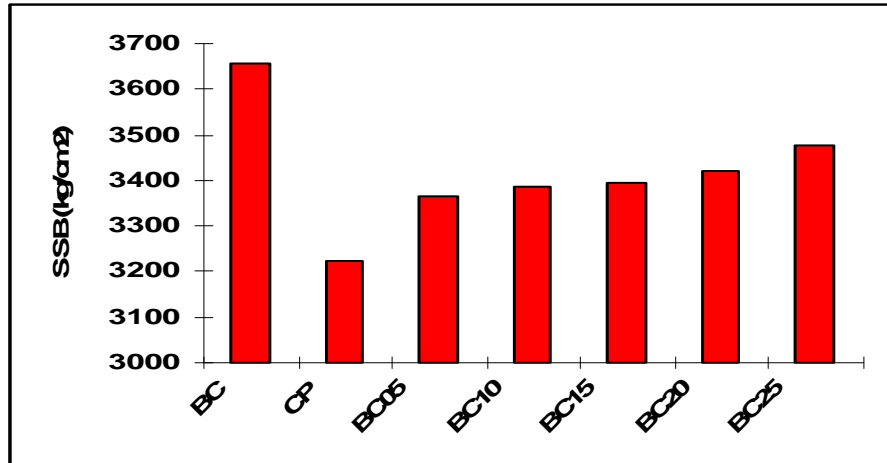


Fig. IV.1 : Surfaces spécifiques Blaine en fonction du pourcentage de la bentonite calcinée

2.1.2 La composition chimique des matériaux utilisés

La composition chimique de ciment, la bentonite naturelle, calcinée, et les différents mélanges sont indiqués dans le Tableau IV. 2 et la Figure IV. 2 :

Tableau .IV. 2 : Composition chimique des matériaux utilisés

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Perte au feu |
|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|--------------|
| Bentonite naturelle | 63,45 | 11,85 | 4,8 | 3,16 | 2,58 | 0,21 | 1,24 | 1,18 | 0,098 |
| Bentonite calcinée | 66,72 | 14,07 | 6,53 | 3,33 | 2,69 | 0,21 | 1,24 | 1,2 | 0,095 |
| CP | 20,66 | 3,62 | 6,32 | 64,61 | 1,56 | 1,49 | 0,30 | 0,18 | 1,43 |
| BC05 | 23,33 | 4,18 | 6,41 | 61,35 | 1,53 | 1,32 | 0,41 | 0,25 | 1,33 |
| BC10 | 26,35 | 5,06 | 6,44 | 58,01 | 1,58 | 1,33 | 0,49 | 0,24 | 1,24 |
| BC15 | 27,44 | 5,30 | 6,43 | 56,20 | 1,51 | 1,32 | 0,41 | 0,25 | 1,2 |
| BC20 | 30,04 | 5,66 | 6,39 | 52,79 | 1,39 | 1,10 | 0,60 | 0,256 | 1,17 |
| BC25 | 31,93 | 6,01 | 6,38 | 50,62 | 1,39 | 1,06 | 0,67 | 0,26 | 1,2 |

La Figure VI.2 représente la variation des taux des principaux oxydes dans le ciment en fonction de la teneur en bentonite calcinée.

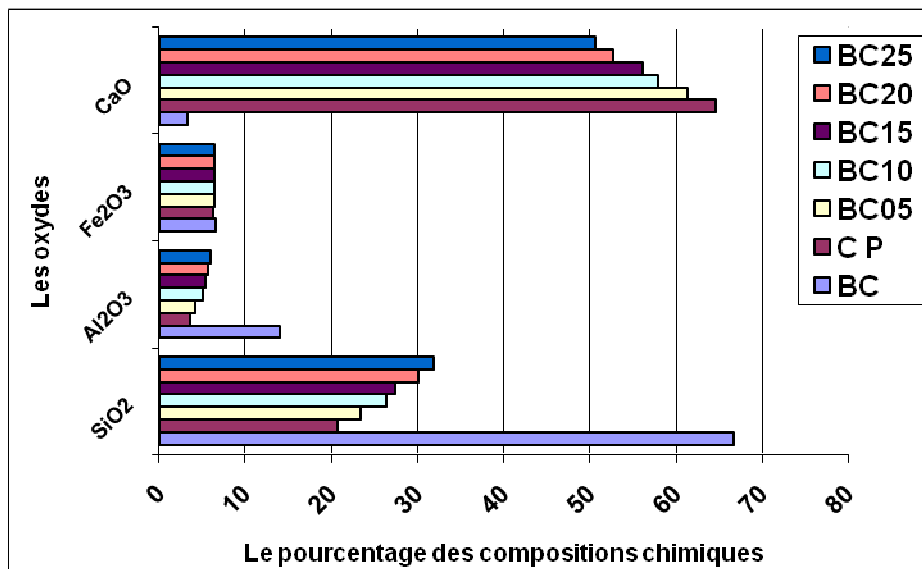


Fig. IV.2 : Variation du pourcentage des oxydes dans le liant en fonction de la teneur de la bentonite calcinée

-L'incorporation des additions pouzzolaniques augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O et Na_2O) et diminue le taux d'oxyde de chaux (CaO). On voit que le pourcentage en teneur d'anhydride sulfurique (SO_3) est inférieur à 4% comme exigé par la norme NF EN 196-2.

2.1.3 La pâte du ciment

2.1.3.1 La prise et la consistance

L'effet de la bentonite calcinée sur la prise est présenté dans les Figures VI.3, VI.4 et le Tableau VI.3 qui présentent la variation du temps de prise et le rapport E/C en fonction des différents pourcentages de bentonite calcinée.

Tableau IV.3 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur le temps de prise et le rapport E/C

| Constituants | CP | BC05 | BC10 | BC15 | BC20 | BC25 |
|----------------------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Eau (g) | 118.50 | 121 | 121.50 | 123.50 | 124 | 125 |
| Le rapport E/C | 0.237 | 0.242 | 0.243 | 0.247 | 0.248 | 0.250 |
| Le rapport E/C (%) | 23.70 | 24.20 | 24.30 | 24.70 | 24.80 | 25.00 |
| Début de prise (min) | 135 | 132 | 118 | 117 | 109 | 96 |
| Fin de prise (min) | 221 | 213 | 185 | 177 | 156 | 129 |
| Temps de prise (min) | 86 | 81 | 67 | 60 | 47 | 33 |

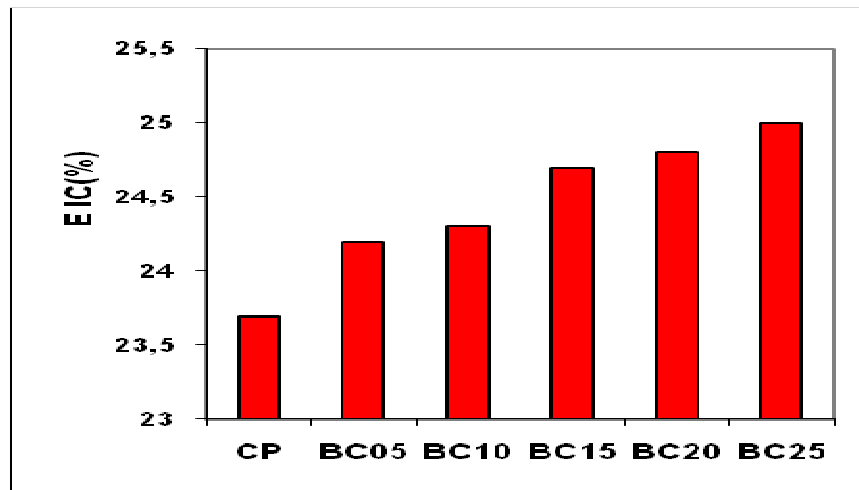


Fig. IV.3 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur le rapport E/C

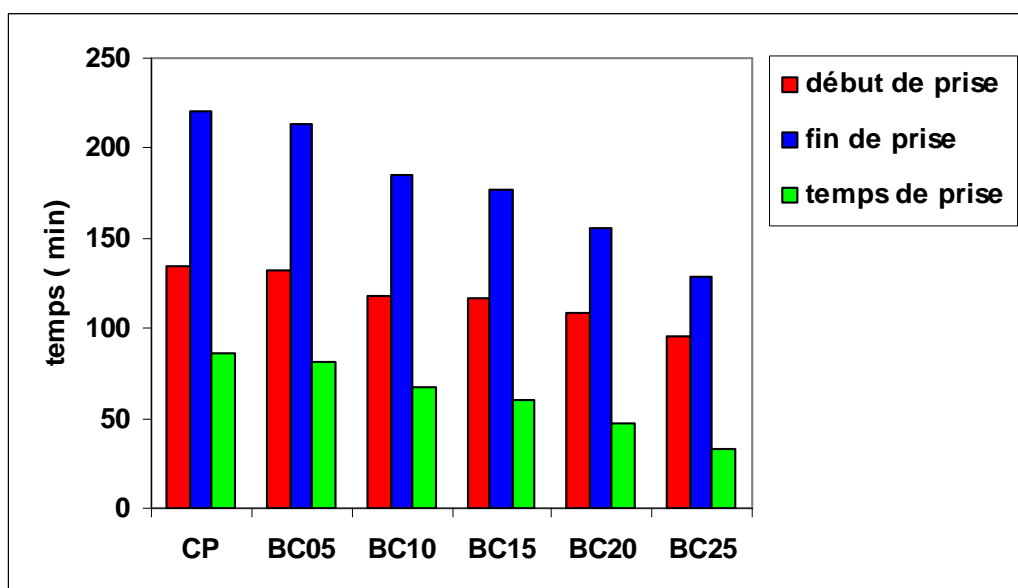


Fig. IV.4 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur le temps de prise

D'après les résultats en-dessus, il apparaît que l'ajout de la bentonite affecte les temps de prise puisqu'un écart minimal de 19 minutes est enregistré entre la pâte témoin CP et BC10, BC15, BC20, BC25.

On remarque aussi que l'augmentation du pourcentage de la bentonite calcinée augmente le rapport E/C et par conséquent la réduction du temps de prise de ciment. Il est clair que la défloculation des grains de la pâte (ciment+bentonite calcinée) suscite un important apport d'eau par rapport à celle du ciment, cela ne peut s'expliquer que par la finesse des mélanges.

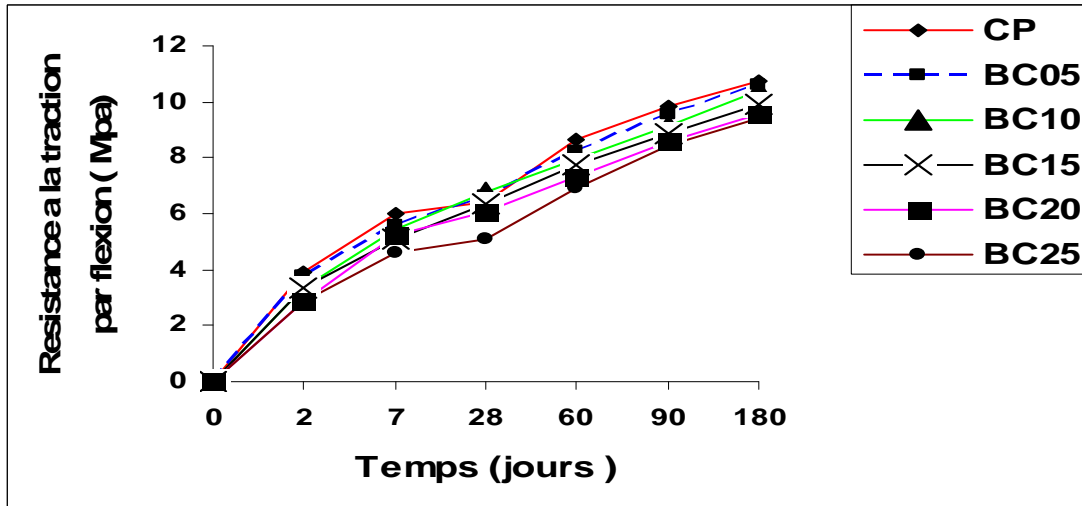
2.2 Résistance mécanique des mortiers

2.2.1 La résistance à la traction

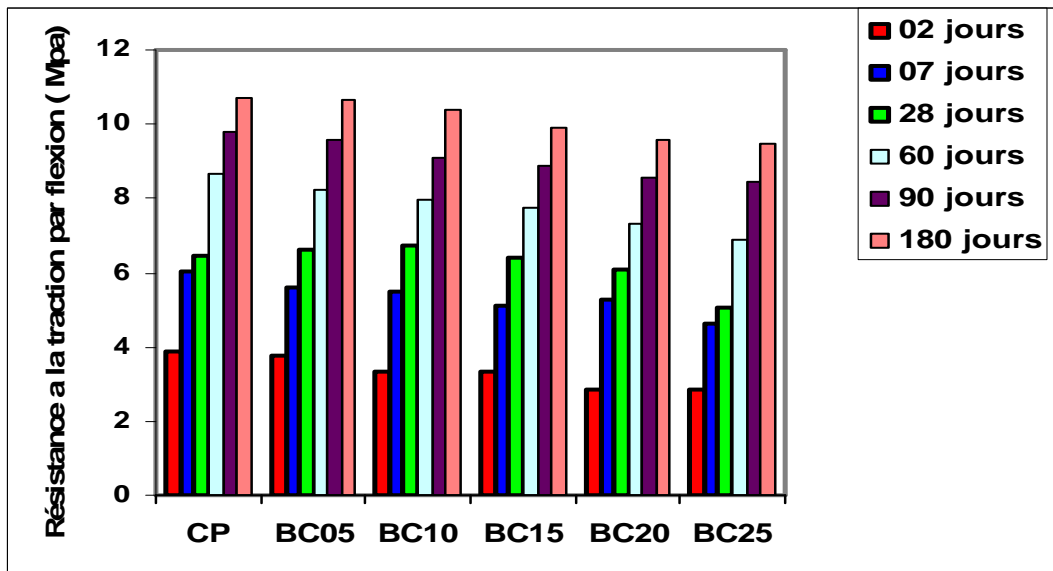
Les résultats de la variation de la résistance à la traction en fonction des différents pourcentages de la bentonite calcinée sont présentés dans le Tableau IV.4 et la Figure IV.5. Il est constaté que la résistance à la traction augmente avec l'âge mais diminue avec le pourcentage de l'ajout.

Tableau IV.4 : Résistances à la traction des mortiers à différents âges

| Age | CP | BC05 | BC10 | BC15 | BC20 | BC25 |
|-----------|-------|-------|------|------|------|------|
| 02 jours | 3.88 | 3.75 | 3.35 | 3.34 | 2.84 | 2.83 |
| 07 jours | 6.02 | 5.58 | 5.47 | 5.12 | 5.25 | 4.63 |
| 28 jours | 6.44 | 6.6 | 6.75 | 6.38 | 6.09 | 5.06 |
| 60 jours | 8,66 | 8 ,22 | 7,98 | 7,74 | 7,31 | 6,89 |
| 90 jours | 9,82 | 9,56 | 9,12 | 8,88 | 8,56 | 8,44 |
| 180 jours | 10,73 | 10,63 | 10,4 | 9,89 | 9,58 | 9,45 |



-a-



-b-

Fig. IV.5 : Résistances à la traction des mortiers à différents âges et teneurs en bentonite calcinée

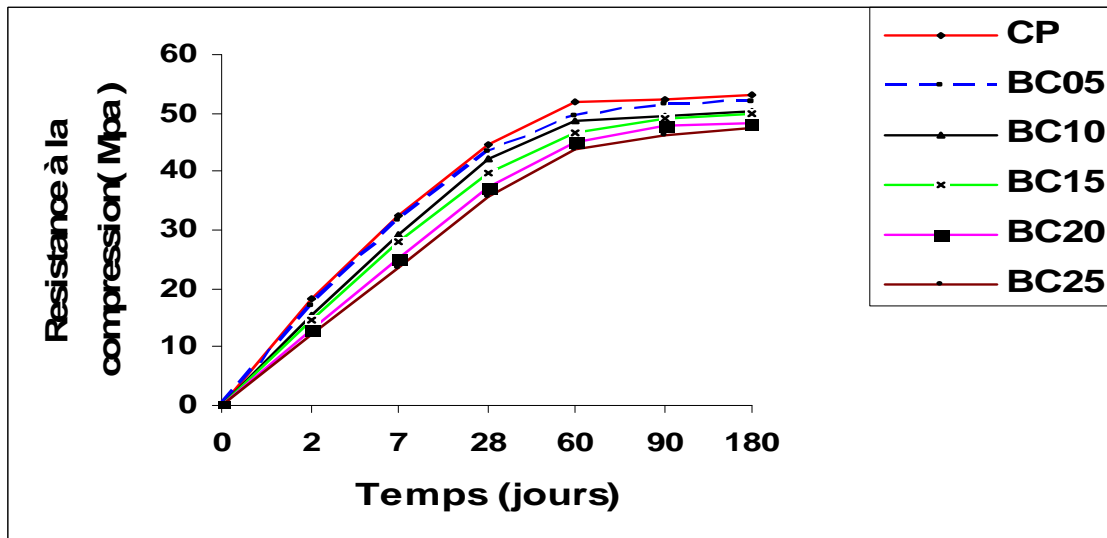
2.2.2 La résistance à la compression

Les différents résultats de la résistance à la compression sont représentés dans le Tableau IV.5 et la Figure IV.6.

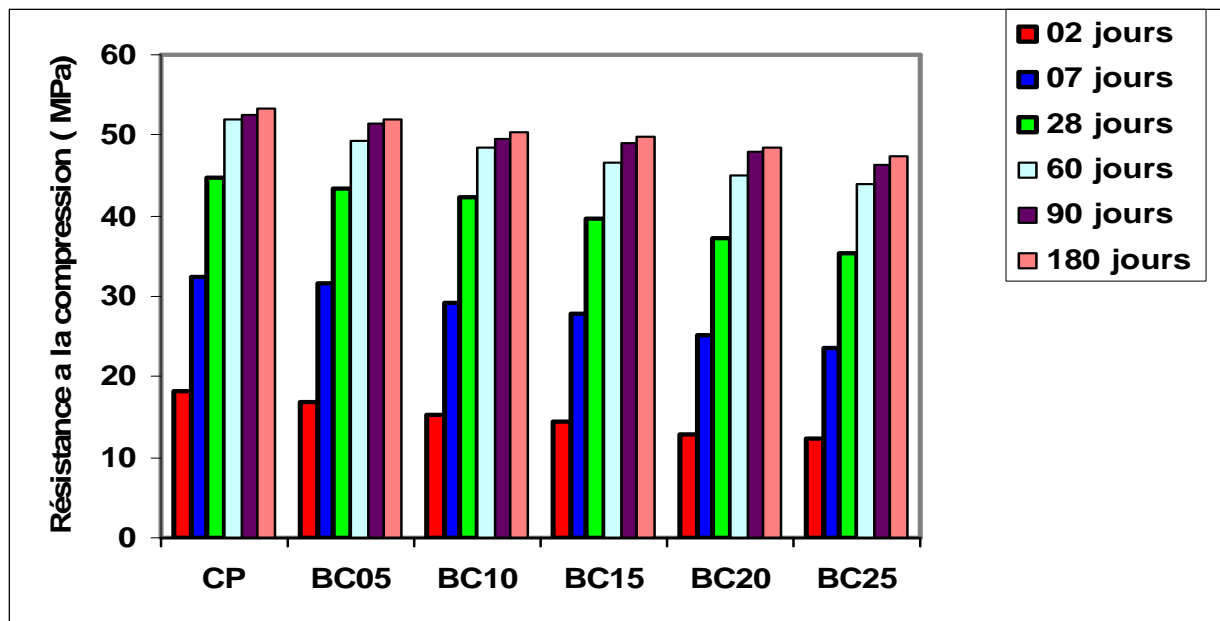
Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.5 : Résistances à la compression des mortiers à différents âges

| Age | CP | BC05 | BC10 | BC15 | BC20 | BC25 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 02 jours | 18.1 | 16.91 | 15.28 | 14.54 | 12.85 | 12.33 |
| 07 jours | 32.3 | 31.5 | 29.1 | 27.85 | 25.05 | 23.57 |
| 28 jours | 44.6 | 43.3 | 42.2 | 39.6 | 37.16 | 35.48 |
| 60 jours | 51,97 | 49,38 | 48,46 | 46,55 | 45,12 | 43,92 |
| 90 jours | 52,42 | 51,31 | 49,62 | 49,1 | 48,02 | 46,25 |
| 180 jours | 53,25 | 52,06 | 50,39 | 49,94 | 48,41 | 47,35 |



-a-



-b-

Fig. IV.6 : Résistances à la compression des mortiers à différents âges et teneurs en bentonite calcinée

L'analyse des résultats de la Figure IV.6 et le Tableau IV.5 permet d'apporter les commentaires suivants :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.
- La diminution de la résistance en fonction de l'augmentation du pourcentage de la bentonite calcinée est attribuée principalement à l'activité lente de cette dernière. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane artificielle et le Ca(OH)_2 libéré par l'hydratation du ciment, ce qui donne à la pouzzolane artificielle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances.
- L'incorporation de 5 % et 10 % de bentonite calcinée donne des réponses mécaniques assez proches d'un ciment ordinaire, qui est de l'ordre de 42–43MPa. Tandis que pour les autres pourcentages la résistance enregistrée est inférieure à 40 MPa.

2.2.3 Étude de l'activité pouzzolanique de bentonite calcinée

2.2.4 La pouzzolanité

L'activité pouzzolanique ou pouzzolanité est l'aptitude de certains matériaux, dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer de l'hydroxyde de calcium (ou Portlandite, ou chaux éteinte) en présence d'eau pour former des hydrates analogues à ceux du ciment Portland, possédant les mêmes propriétés liantes. L'origine du mot « pouzzolane » vient d'Italie. Ce sont les romains qui ont remarqué dès l'antiquité que l'ajout de fines volcaniques prélevées sur les pentes du Vésuve, non loin de Pouzzoles, dans des mortiers de chaux permettait d'augmenter significativement leur résistance mécanique et leur durabilité. La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution – précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 et un matériau pouzzolanique. Les principales phases formées lors de cette réaction sont [Dron, 1978] :

- Des silicates de calcium hydratés CSH, qui se présentent sous la forme d'un gel de faible cristallinité.
- L'aluminate tétracalcique hydraté C_4AH_{13} , hexagonal.

L'hydratation du ciment produisant naturellement de la portlandite, les matériaux pouzzolaniques sont couramment utilisés comme ajouts dans les bétons ou les liants hydrauliques afin d'améliorer leurs performances mécaniques. Ainsi, du fait de leur faible coût de revient, certains sous produits industriels possédant des propriétés pouzzolaniques

comme les cendres volantes ou les fumées de silice, ont trouvé de nombreuses applications dans l'industrie cimentière.

2.3.2.2 Evaluation de l'activité pouzzolanique de la bentonite calcinée

Une méthode simple et pertinente pour mettre en évidence l'activité pouzzolanique de bentonite calcinée, consiste à suivre l'évolution des propriétés mécaniques de mélanges « ciment + bentonite calcinée ». Si on observe une augmentation des performances au cours du temps alors le matériau est considéré comme étant pouzzolanique [Lea, 1973], [Rich, 2005].

Pour qu'un matériau additif ait une caractéristique pouzzolanique, il faut vérifier les deux conditions suivantes :

- Sa composition chimique : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$ (ASTM C 618)
- Son indice d'activité I est : $0,67 < I < 1$.

L'expression de l'indice d'activité, notée « I », utilisée est celle définie par la norme NF EN450-10 octobre 1995 et dont la formulation mathématique est donnée par l'expression 4.1 :

$$I = R / R_{réf} \quad (4.1)$$

- R : est la résistance en compression (ou flexion/traction) d'une éprouvette normalisée de mortier de même âge, préparée avec un liant contenant 75 % de ciment et 25 % de cendres.
- $R_{réf}$: est la résistance à la compression (ou flexion/traction) du mortier avec 100% de ciment de référence.

A partir des résultats de résistances mécaniques, l'indice d'activité des différents mortiers modifiés par ajout de bentonite calcinée est présenté dans le Tableau IV.6 et la Figure IV.7.

Tableau IV.6 : Indice d'activité des différents mélanges à 07, 28 et 90 jours

| | Coefficient d'activité I (07 jours) | Coefficient d'activité I (28 jours) | Coefficient d'activité I (90 jours) |
|--------|--|--|--|
| C.P | 100% | 100% | 100% |
| BC 5% | 96.13% | 97.08% | 97.88% |
| BC 10% | 90.09% | 94.39% | 94.65% |
| BC 15% | 86.22% | 88.78% | 93.66% |
| BC 20% | 77.56% | 83.32% | 91.60% |
| BC 25% | 73.20% | 79.55% | 88.22% |

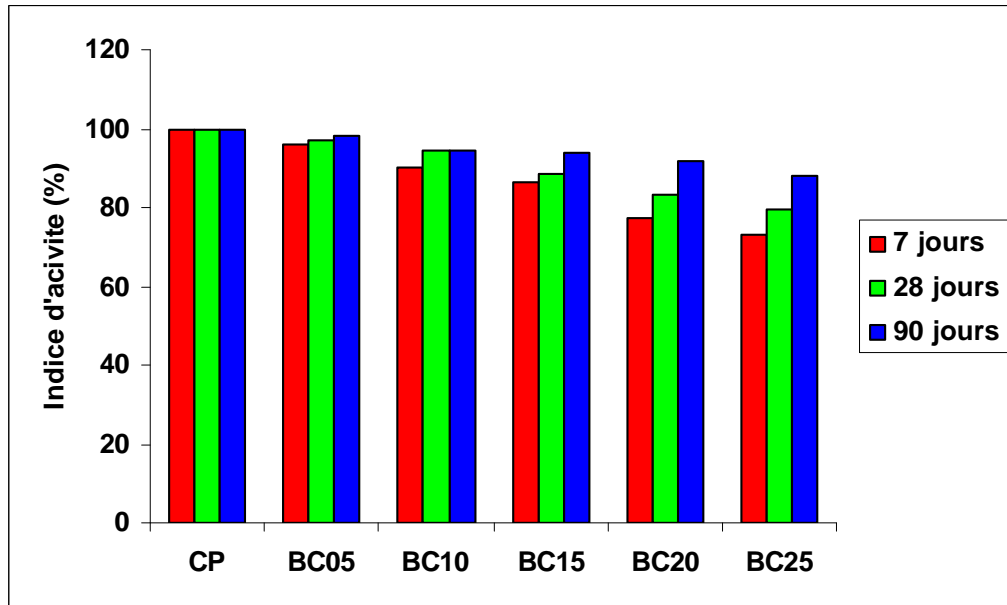


Fig. IV.7 : Influence de la teneur en bentonite calcinée sur l'indice d'activité de mélange

- La Figure IV.7 et le Tableau IV.6 montre une activité pouzzolanique à 7 jours, 28 ou 90 jours ayant des valeurs supérieures à 70% pour les différents mélanges.
- La norme indique qu'une addition réactive possède un indice d'activité compris entre 0,67 et 1 ce qui est le cas de la bentonite calcinée puisque son indice d'activité est de l'ordre de 0,79. A titre de comparaison, l'indice de la pouzzolane de Béni-Saf est de 0,82 [Laoufi, 2002].

2.3 Conclusion

Notre étude a permis de confirmer la possibilité de la valorisation de l'argile de type montmorillonite (bentonite) de M'Zila en tant que matériau substituable en partie au ciment. Il a été utilisé dans ce travail différentes substitutions de la bentonite calcinée au ciment pour la confection des mortiers (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, et 25%). Les résultats obtenus nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La pouzzolane artificielle à base de la bentonite calcinée vérifie les conditions requises pour un matériau pouzzolanique.
- L'indice d'activité étant de 0,79 donc compris entre 0,67 et 1, indique que la bentonite calcinée n'est pas un matériau inerte mais plutôt un matériau réactif qui réagit avec le ciment pendant son hydratation afin de développer certaines performances mécaniques.
- La consistance normalisée du ciment avec les différents pourcentages d'ajout est obtenue pour un rapport E/C variant entre 0,235 et 0,25.

- Les résultats des essais mécaniques sur les mortiers ont montrés que la pouzzolane artificielle à base de la bentonite calcinée améliore la résistance à la compression en fonction de l'âge, car elle donne naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores.

3. LE BETON AUTOPLACANT

3.1 Introduction

L'objet de cette partie de l'étude est d'utiliser cette pouzzolane artificielle (la bentonite calcinée) comme substitution d'une partie de ciment dans un béton autoplaçant en étudiant l'influence de la bentonite calcinée sur les performances mécaniques et aussi la durabilité (attaques acides et sulfates, carbonatation et retrait) des bétons autoplaçants. Pour cela, nous avons confectionné quatre bétons à base de différentes teneurs en bentonite calcinée (0, 10, 20 et 30 %).

3.2 Résultats des essais à l'état frais

La caractérisation à l'état frais des bétons autoplaçants s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC 2008: étalement au cône, écoulement à la boîte en L, et stabilité au tamis.

3.2.1 Étalement

Les résultats de ces essais sur les bétons confectionnés sont présentés dans le Tableau IV.7 et les Figures IV.8, IV.9 :

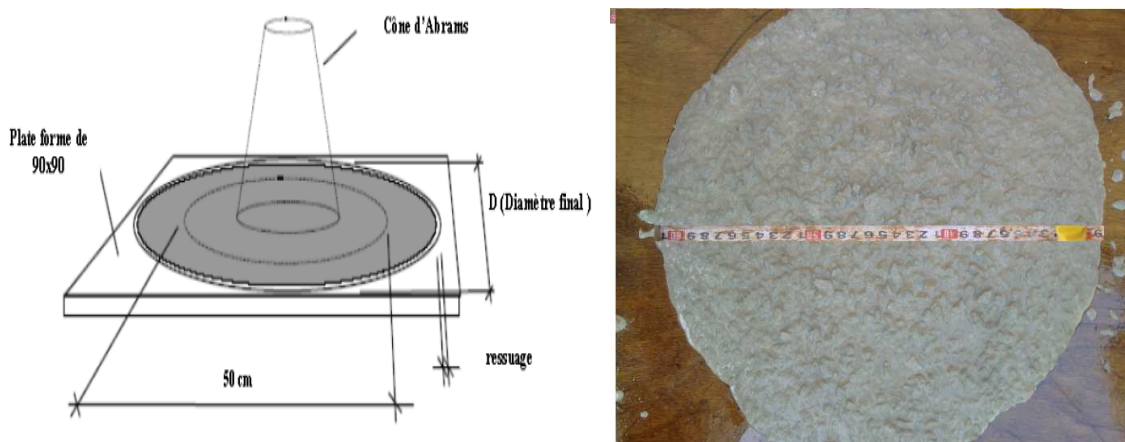


Fig. IV.8: Etalement au cône d'Abrams

Tableau IV.7 : Résultats d'étalements des BAP

| L'essai | Les paramètres recherches | BAPT | BAP 10 | BAP 20 | BAP 30 |
|-------------|---------------------------|------|--------|--------|--------|
| L'étalement | Le diamètre Ø (cm) | 65 | 64 | 66 | 65 |
| | T ₅₀ (s) | 3,62 | 3,48 | 3,23 | 3,15 |

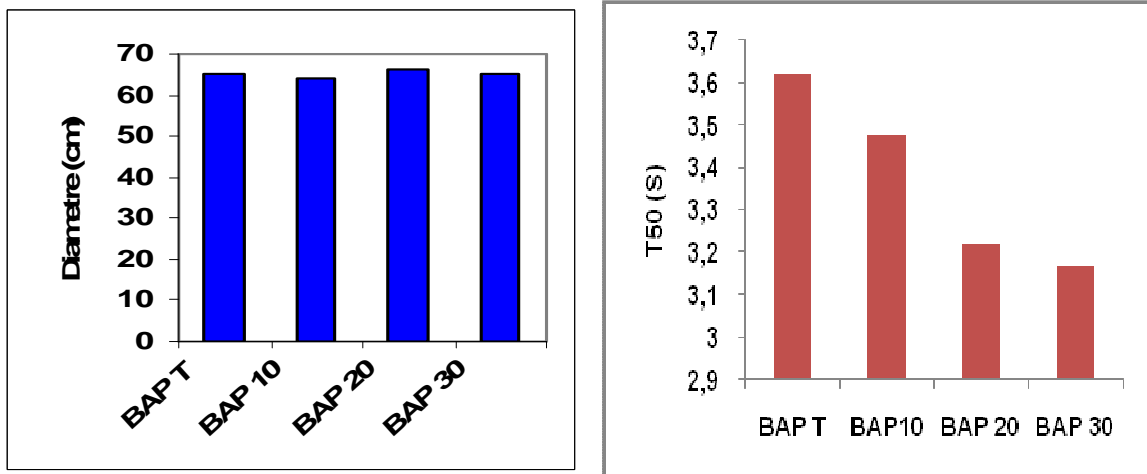


Fig. IV.9 : Résultats d'étalements des BAP

D'après ces résultats, nous pouvons déduire alors que les quatre bétons formulés avec ou sans bentonite calcinée répondent bien aux recommandations de la AFGC, 2008.

La Figure IV.9 a montré que les quatre BAP testés vérifient la condition d'étalement imposée par la recommandation de L'AFGC ($60\text{cm} \leq \text{Ø} \leq 75\text{ cm}$).

Les valeurs de T₅₀ obtenues sont conformes aux spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais ($3\text{s} \leq T_{50} \leq 5\text{s}$).

3.2.2 Résistance à la ségrégation dynamique

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure H1 et H2 et le résultat est exprimé en terme de taux de remplissage $H2 / H1$ (AFGC, 2008).

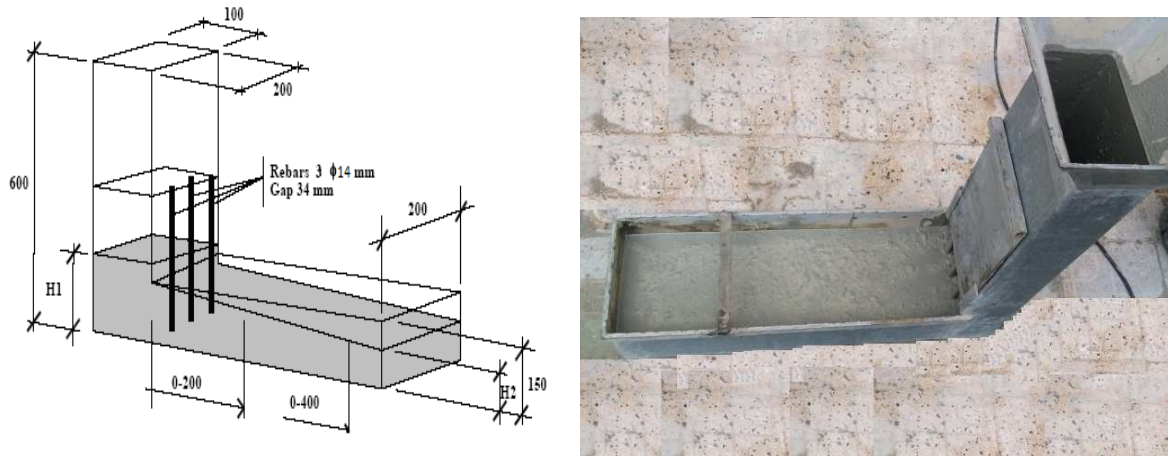


Fig. IV.10 : Boite en L

Tableau IV.8: Résultats de la boite en L des BAP

| L'essai | Les paramètres recherches | BAPT | BAP10 | BAP20 | BAP30 |
|------------|---------------------------|------|-------|-------|-------|
| Boite en L | H2/H1 (%) | 81 | 85 | 82 | 83 |

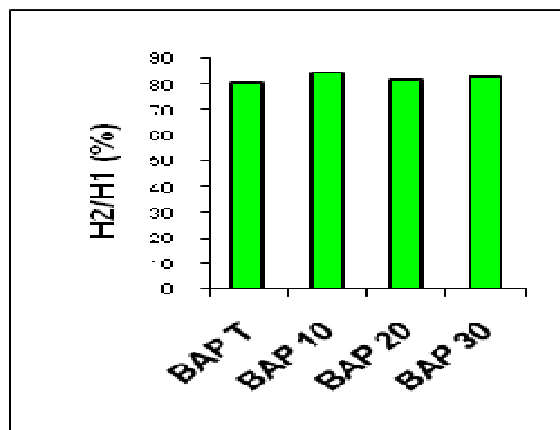


Fig. IV.11: Résultats d'étalements des BAP

D'après la Figure IV.11 toutes les formulations présentent des taux de remplissage supérieur à 80%. Par conséquent ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armatures qui font obstacle.

3.2.3 Résistance à la ségrégation statique

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes (AFGC, 2008):

- $0\% < \pi \text{ Laitance} < 15\%$: stabilité satisfaisante.
- $15\% < \pi \text{ Laitance} < 30\%$: stabilité critique.
- $\pi \text{ Laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

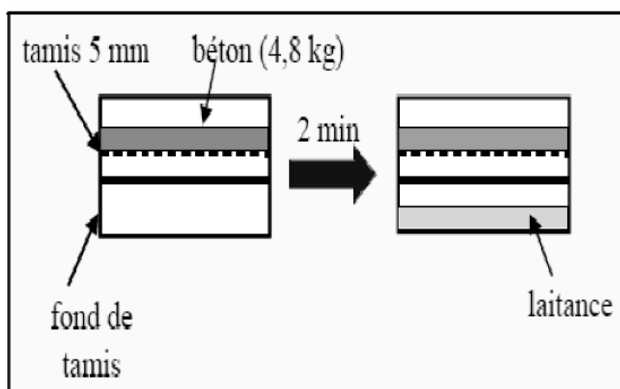


Fig. IV.12 : Essai de stabilité au tamis

Tableau IV.9: Résultats de l'essai de stabilité au tamis des BAP

| L'essai | Les paramètres recherchés | BAP T | BAP 10 | BAP 20 | BAP 30 |
|--------------------|---------------------------|-------|--------|--------|--------|
| Stabilité au tamis | π Laitance (%) | 7 | 8 | 6 | 4 |

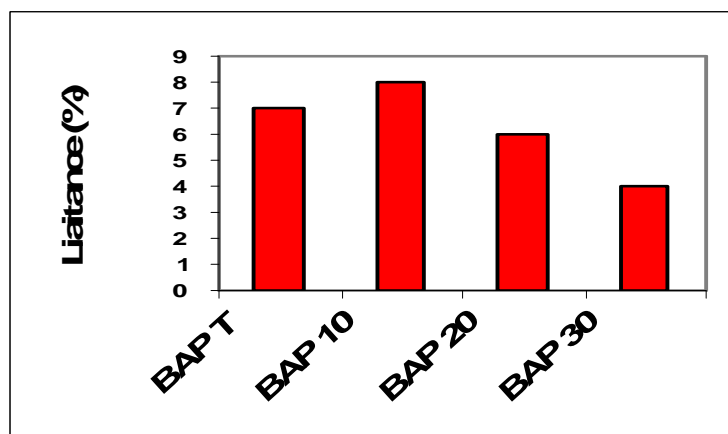


Fig. IV.13: Résultats de l'essai de stabilité au tamis des BAP

Sur la ségrégation statique, les résultats issus des essais de stabilité au tamis (Fig. IV.13) montrent que les quatre compositions testées ont une stabilité satisfaisante ($0 \leq \pi \leq 15\%$).

3.2.4 L'essai de J-Ring

L'essai de J-Ring permet d'apporter des informations sur la déformabilité restreinte, et l'homogénéité du mélange. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque les quatre BAP ne présentent aucun blocage à travers les armatures (Fig. III.14).

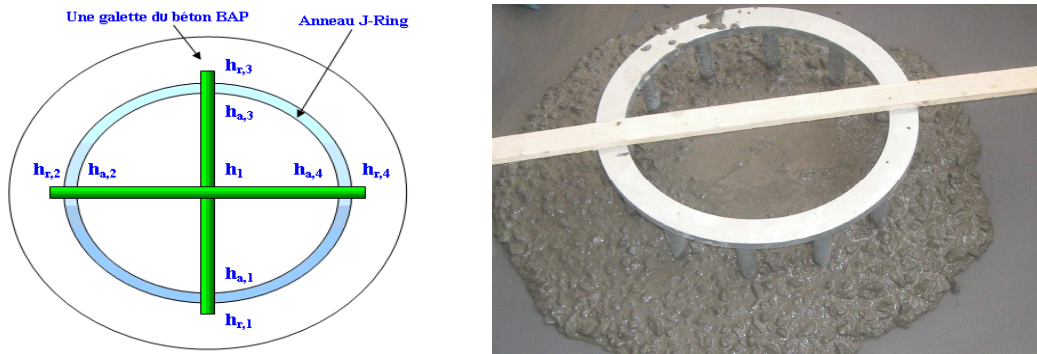


Fig. IV.14 : Essai de J-Ring

Tableau IV.10 : Résultats de l'essai de J-Ring des BAP

| L'essai | Les paramètres recherches | BAPT | BAP 10 | BAP 20 | BAP 30 |
|---------|---------------------------|------|--------|--------|--------|
| J-Ring | h_r (mm) | 7,1 | 6,9 | 6,8 | 6,6 |
| | h_m (mm) | 5,5 | 5,3 | 5,1 | 5,1 |
| | $2h_r - h_m$ (mm) | 8,7 | 8,5 | 8,5 | 8,1 |

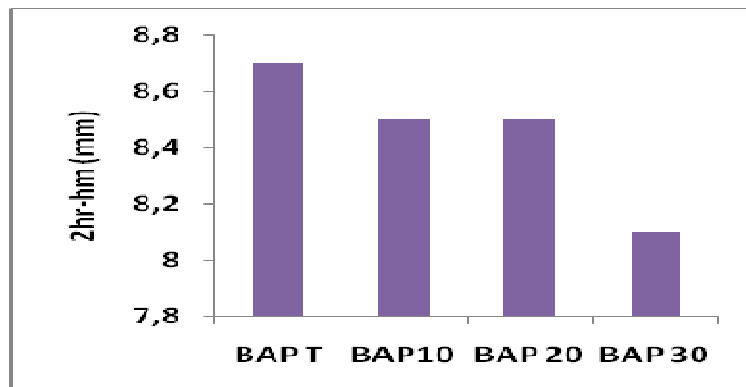


Fig. IV.15: Résultats de l'essai de J-Ring des BAP

3.2.5 Masse volumique

L'effet de la bentonite calcinée sur la masse volumique est présenté sur le Tableau IV.11. d'après cet tableau on remarque que la bentonite calcinée, intervient par sa finesse et s'insère dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité ; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique. Cette dernière augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, sa finesse ainsi que le taux de superplastifiant. On peut dire qu'il y a une proportionnalité entre la masse volumique et ces deux paramètres, cette proportionnalité peut être expliquée par l'effet de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la fermeté du béton, donc on peut prouver que l'effet granulaire, conditionné par une finesse de mouture élevée explique ce phénomène et bien sûr par l'intermédiaire du superplastifiant qui assure une meilleure mobilité.

Tableau IV.11: Masses volumiques des BAP

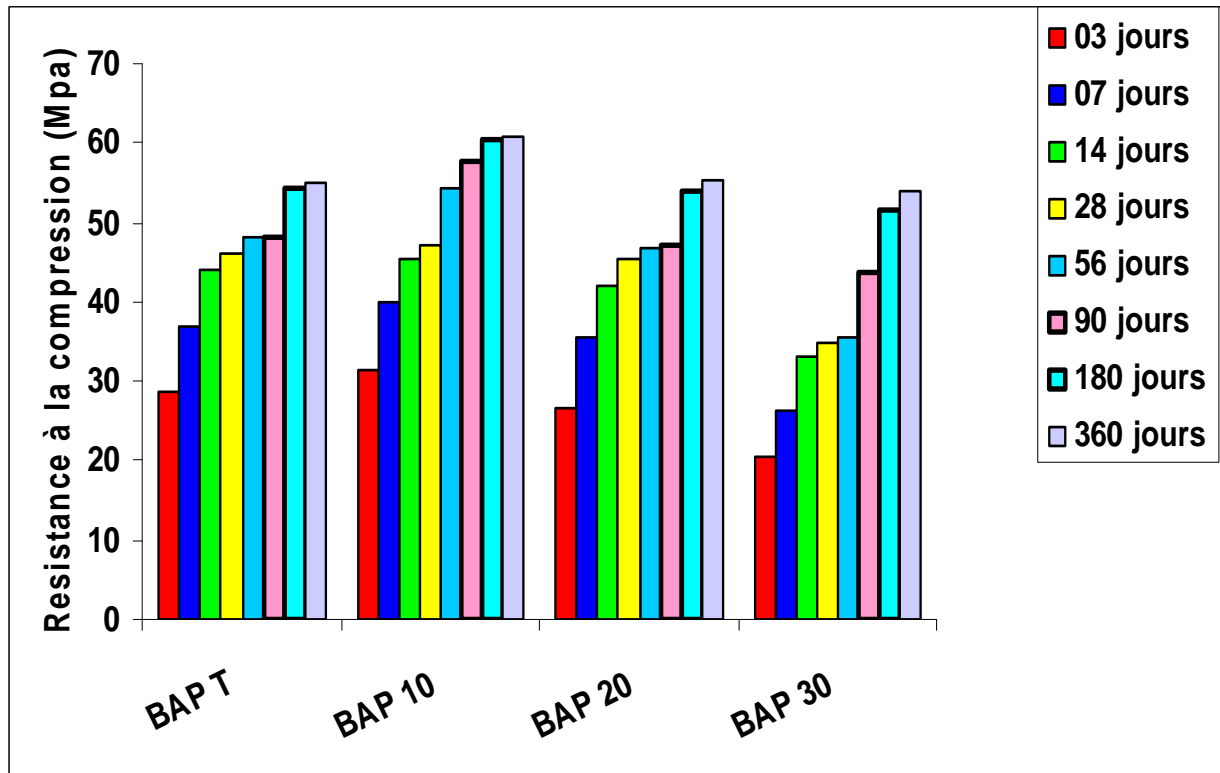
| | BAP T | BAP 10 | BAP 20 | BAP 30 |
|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Masse volumique réelle à l'état frais (Kg/m ³) | 2350.13 | 2353.83 | 2354.71 | 2357.25 |
| Masse volumique théorique à l'état frais (Kg/m ³) | 2332.94 | 2334.50 | 2333.71 | 2334.23 |

3.3 Résultats des essais sur bétons durcis

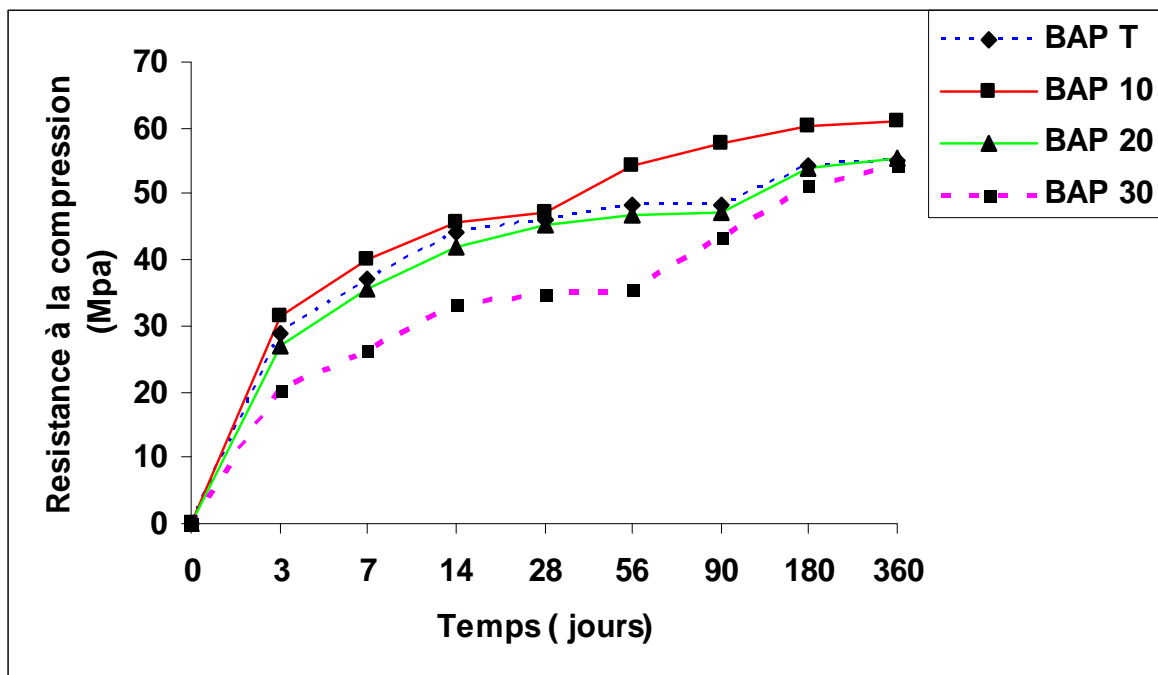
Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés, sont des éprouvettes cubique (10x10x10) cm³. Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance déterminée (3, 7, 14,28, 56, 90, 180 et 360 jours).

3.3.1 Evolution des résistances mécaniques en compression

Les résultats des essais des résistances à la compression sur des éprouvettes des bétons autoplacants sont illustrés sur la Figure IV.16 :



(a)



(b)

Fig. IV.16: Résistance à la compression de différents bétons autoplaçants

Sur les Figures IV.16 a et IV.16.b, il est noté que quelque soit le type du béton et l'échéancier de mesure (3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 et 360 jours), les résistances à la compression augmentent continuellement sans aucune chute confirmant l'activité de la bentonite calcinée.

On peut remarquer aussi que l'augmentation du taux de substitution du ciment par la bentonite calcinée de 20% et 30% provoque une diminution de résistance à la compression par rapport à celle du béton témoin de l'ordre de 4.33% à 7 jours, 4.53% à 14 jours, de 1.52 % à 28 jours, 3.11% à 56 jours, 2.27% à 90 jours et 0.73% à 180 jours pour un ajout de 20%. Tandis que pour un ajout de 30% est de l'ordre de 28.91% à 07 jours, 24.71% à 14 jours, 24.56 % à 28 jours, de 26.34% à 56 jours, 9.79% à 90 jours et de 5.16% à 180 jours.

Les résistances à la compression des bétons BAP10, sont supérieures à celles d'un béton de ciment portland (BAPT) et au-delà de 28 jours pour le BAP20 et 90 jours pour les BAP30, l'effet de la bentonite devient perceptible, puisque les résistances des bétons à base de bentonite, s'approchent des résistances du béton témoin. Cette cinétique de développement des résistances est assez habituelle avec la vase calcinée [Belas et al., 2009] et s'explique par l'activité de la bentonite et par le fait que l'action pouzzolanique ne devient sensible qu'à partir des âges plus avancés pour se déclencher et fixer la chaux libérée par le ciment au cours de son hydratation pour former de nouveaux silicates de calcium hydratés qui participent à la résistance.

3.4 Résultats de la durabilité

3.4.1 Résultat des attaques acides

3.4.1.1 Acide H₂SO₄

a. Variation des masses

Selon la procédure de la norme ASTM C 267: les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion et pendant 32 semaines.

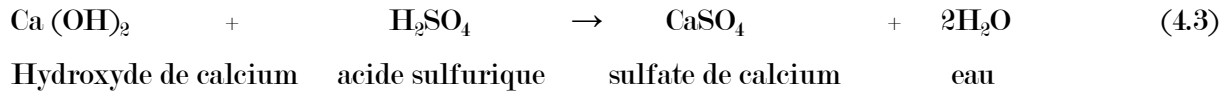
La perte de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation suivante

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100 \quad (4.2)$$

Avec :

- M₁ : masse des éprouvettes avant immersion.
- M₂ : masse des éprouvettes après immersion.

Un cas très agressif et destructif d'attaque par acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique (H_2SO_4). Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause une dégradation accrue. Ce processus est illustré par la formule suivante :



Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide sulfurique H_2SO_4 est illustré par la Figure IV.17.

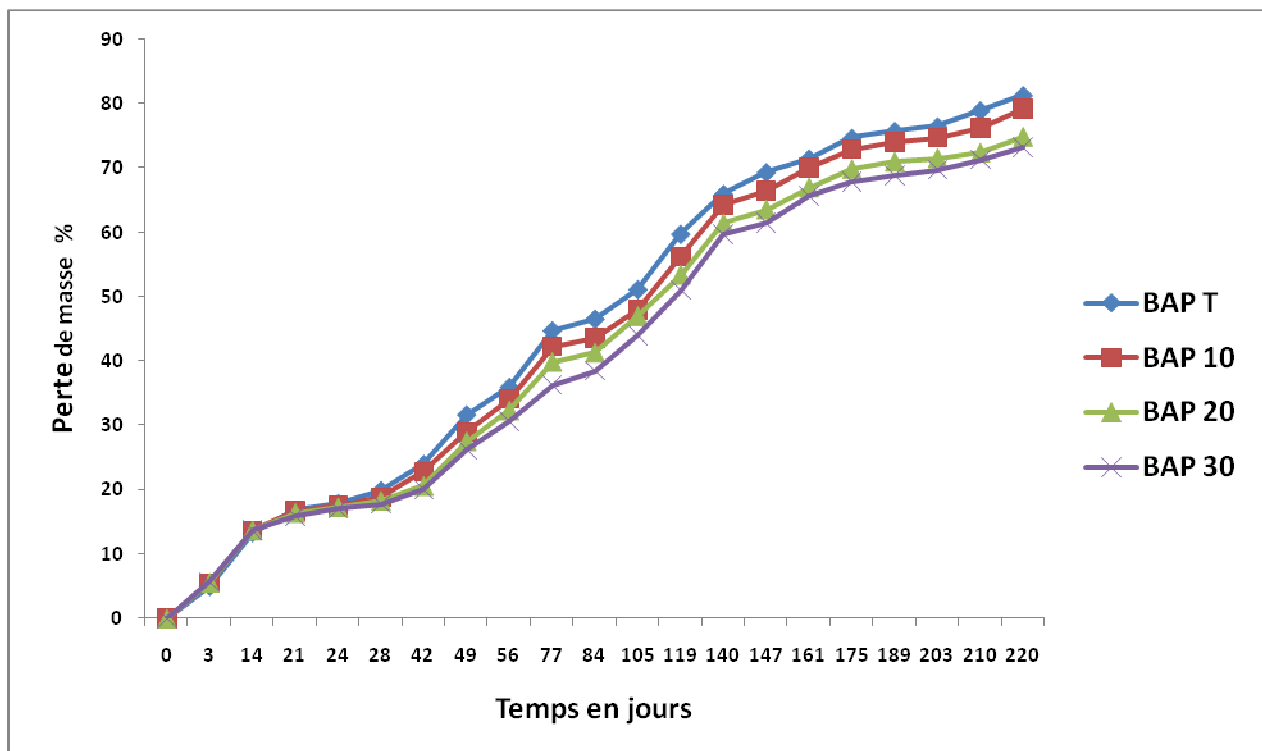


Fig. IV. 17 : Evolution de la perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 2% H_2SO_4 .

On constate d'abord que tous les bétons autoplaçants avec et sans ajout de la bentonite calcinée, sans exception, accusent des pertes de poids permanents à toutes les périodes considérées. Il est remarquable d'apercevoir que tous les bétons autoplaçants avec ajout de la bentonite calcinée sans exception accusent des pertes en masse inférieures à celle du béton témoin et ceci à toutes les échéances de la période d'immersion. La perte de masse est de 81,36 %; 79,22 %; 74,81 % et 73,21 % pour les bétons autoplaçants BAPT, BAP10, BAP20, et BAP30 respectivement à l'échéance 220 jours.

b. Examen visuel

La Figure IV.18 montre l'état des échantillons de tous les bétons d'étude, après 2, 4 et 8 semaines d'immersion dans la solution du 2% H_2SO_4 .

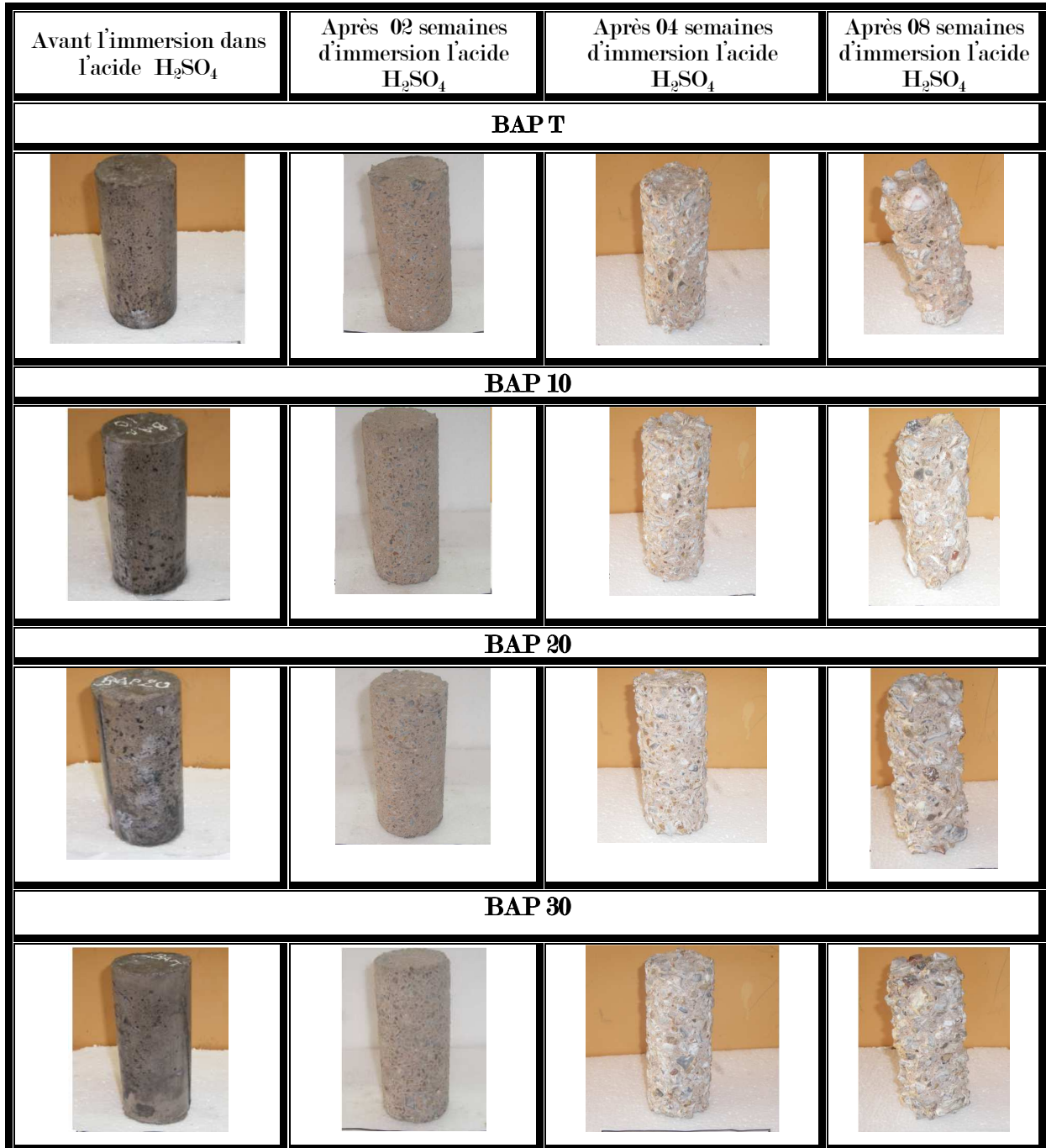


Fig. IV.18 : Dégradation des échantillons du béton après 2, 4 et 8 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique.

L'examen visuel des bétons ayant subi des attaques chimiques en contact avec l'acide sulfurique est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes, et de confirmer et comparer les résultats obtenus. L'état de l'ensemble des échantillons avec et sans bentonite calcinée, après conservation dans la solution acide sulfurique pendant 220 jours, est caractérisé en première vue par une réduction dans le volume.

La Figure IV.19 montre que les échantillons en contact avec l'acide sulfurique forment une couche blanchâtre sur la surface extérieure. Il s'agit du dépôt du gypse, qui résulte de la réaction entre la portlandite et la solution d'attaque [2% H_2SO_4]. En plus de la réaction avec la portlandite, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté [C-S-H], ce qui contribue ainsi à la perte en masse des échantillons immergés dans ce type d'acide et donc une réduction de forme déjà observée. Ces résultats sont en accord avec les observations faites par [Senhadji, 2013 ; Ghrici ,2006 ; Siad, 2010 ; Laoufi, 2015].



Fig. IV.19: Etat des éprouvettes de bétons immergés dans les attaques acides H_2SO_4

3.4.1.2 Acide HCL

a. Variation des masses

L'agressivité de l'attaque d'acide chlorhydrique est provoquée par leur réaction avec une partie d'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment, qui produit un sous-produit de sel de calcium ($CaCl_2$) fortement soluble et facilement enlevé de la pâte affaiblissant de ce fait la structure de l'ensemble du béton. La réaction de base est illustrée par la formule suivante :



L'effet de l'attaque HCl sur les différents bétons d'étude est quantifié en déterminant les pertes en masse des échantillons en contact avec cet acide.

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl à 2% de concentration est illustré par la Figure IV.20.

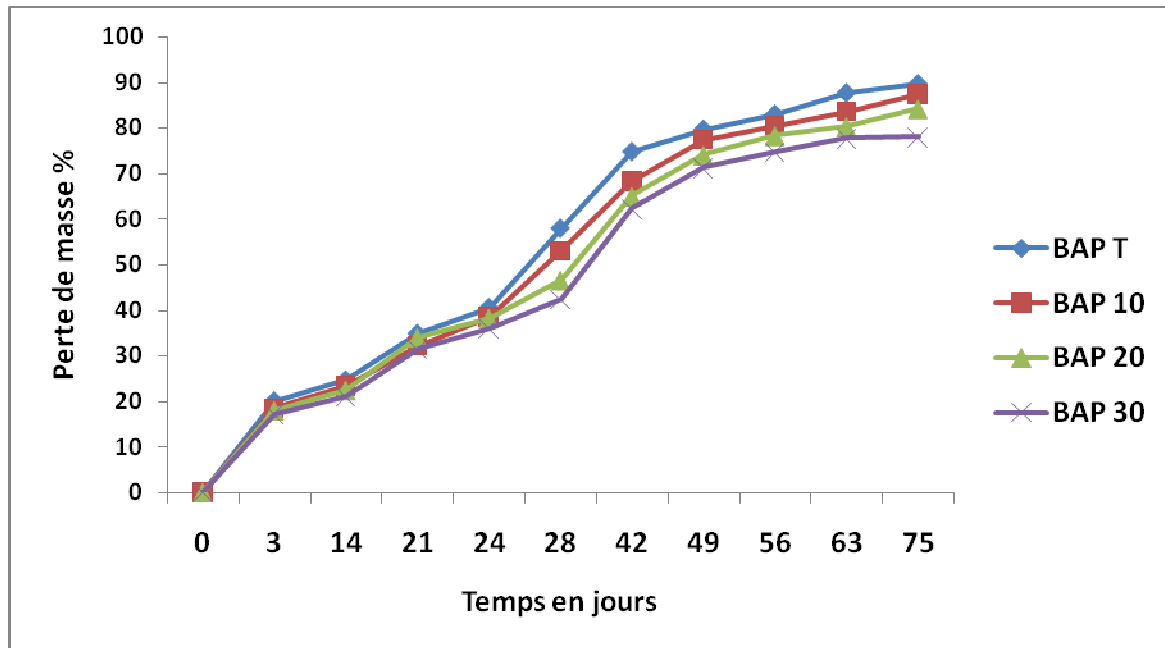


Fig. IV. 20 : Perte de masse des bétons autoplaçants immergés dans la solution HCL.

On constate d'abord que tous les bétons autoplaçants avec et sans ajout de la bentonite calcinée, sans exception, accusent des pertes de poids permanents à toutes les périodes considérées. Il est remarquable d'apercevoir que tous les bétons autoplaçants avec ajout de la bentonite calcinée sans exception accusent des pertes en masse inférieure à celle du béton témoin et ceci à toutes les échéances de la période d'immersion. La réduction de perte de masse est de 89,70%; 87,50% ; 84,20% et 78% pour les bétons autoplaçants BAPT, BAP10, BAP20, et BAP30 respectivement à l'échéance de 75 jours.

b. Examen visuel

L'examen visuel des échantillons en contact avec l'acide chlorhydrique est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes. La Figure IV.21 montre l'état des échantillons avant et après attaque à 2 et 4 semaines d'immersion dans la solution à 2% HCl.

Chapitre IV : Résultats et discussions

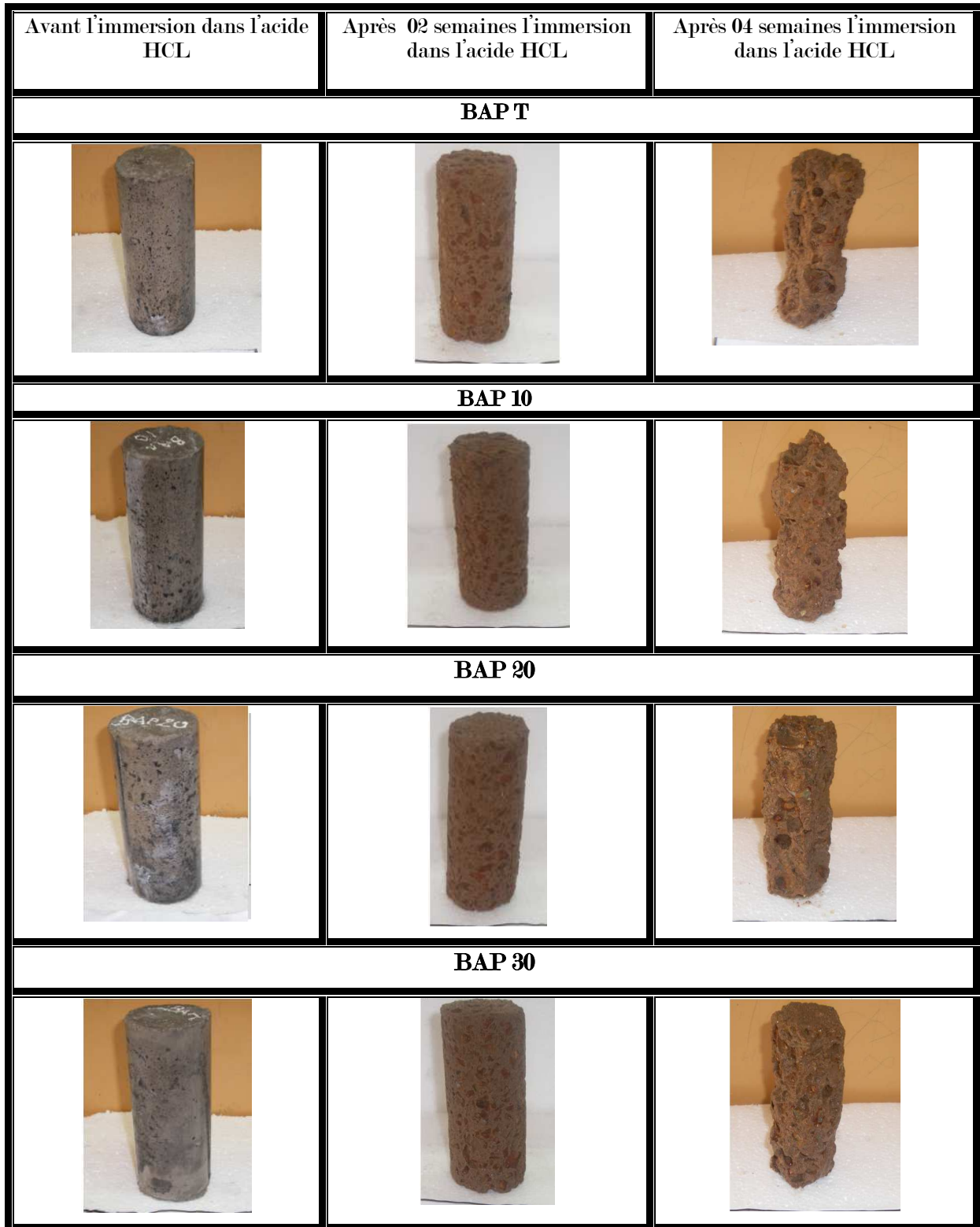


Fig. IV.21 : Dégradation des échantillons du béton après 2 et 4 semaines d'immersion dans la solution d'acide chlorhydrique.

Visuellement, nous distinguons clairement l'état des différents échantillons après 4 semaines d'immersion dans la solution d'acide HCL. Ainsi, le BAP T et le BAP 10 ont perdu totalement

leur forme cylindrique, tandis que le BAP 20 et BAP30, ont subi une moins de dégradation par rapport aux autres bétons, principalement sur les côtés et sur la surface extérieure, où l'acide a décapé la pâte de ciment.

D'après la Figure IV.22 les échantillons en contact avec l'acide chlorhydrique forment une couche de couleur marron sur la surface extérieure.



Fig. IV.22: Etat des éprouvettes de bétons immergés dans l'attaque acide HCL

3.4.1.3. Etude comparative

La Figure IV.23 montre variation de la masse des échantillons immergés dans le 2 % des attaques acides (HCL – H_2SO_4) pour le temps 3, 13,56, et 77 jours.

Par comparaison entre les différents BAP, nous pouvons remarquer que le BAPT, BAP10, BAP20 et BAP30 immergés dans la solution HCL présente des pertes de masse plus importantes que les BAP immergés dans la solution H_2SO_4 du surtout aux les échéances 56 et 77 jours.

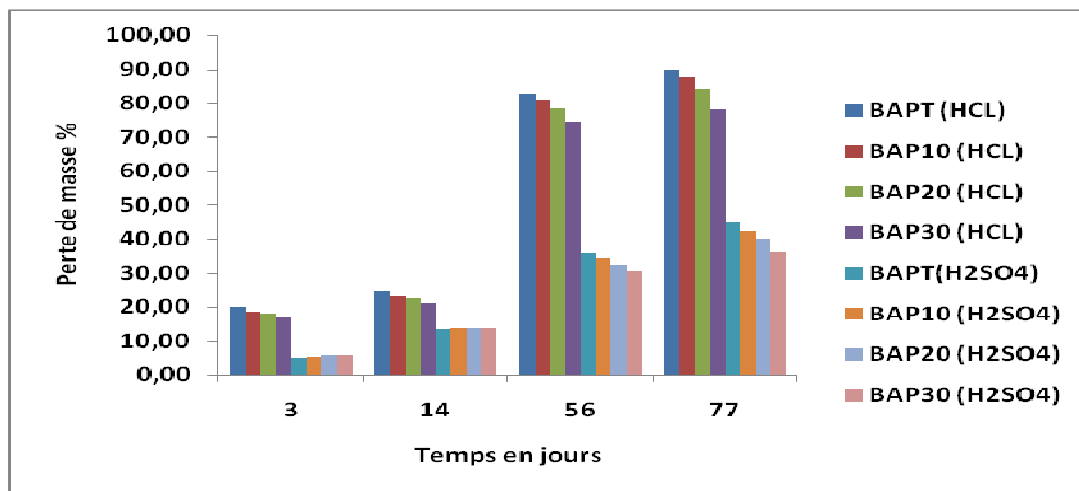


Fig. IV.23: Variation de la masse des échantillons immergés dans les attaques acide (HCL – H_2SO_4).

3.4.3 Résultat de l'attaque sulfate Na_2SO_4

a. **Variation des masses :** La variation des masses des échantillons immergés dans la solution 2% Na_2SO_4 est représenté en fonction du temps d'immersion sur la Figure IV.24.

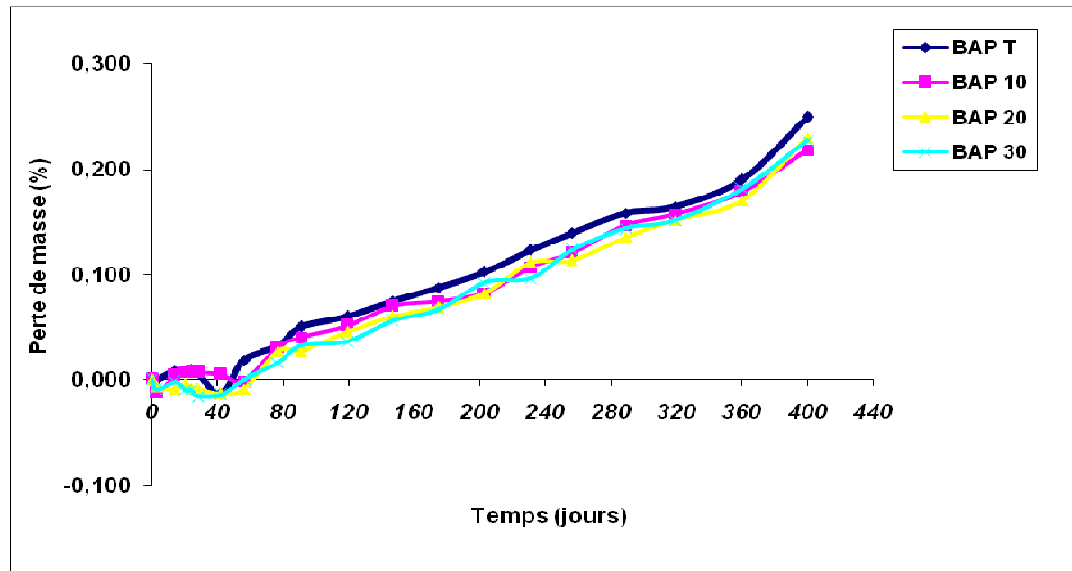


Fig. IV. 24 : Perte de masse des bétons autoplaçants immergés dans la solution Na_2SO_4

Une perte de masse est observée durant les premiers temps d'immersion pour tous les BAP immergés dans la solution sulfatique suivie d'une augmentation de masse. La phase interstitielle contenue dans la matrice a un pH basique d'environ 13. Si cette dernière se trouve au contact d'une eau distillée, très peu chargée en ions, et donc de pH plus faible que celui de la solution interstitielle (environ 7), la pâte de ciment se trouve en déséquilibre avec ce milieu extérieur. Il y a alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte, par la dissolution de la portlandite et enfin par une attaque progressive des gels CSH.

A ce stade de l'essai, il n'est pas possible de mettre en évidence une dégradation caractéristique de l'attaque sulfatique externe. Nous remarquons une évolution positive de la variation de la masse de tous les bétons en fonction de la durée d'immersion dans la solution.

Cette évolution est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents bétons, et à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution. Khelifa et al. ,2008 ajoutent que le gain de masse peut provenir de l'eau qui remplit les fissures, mais aussi d'une masse d'eau utilisée pour précipiter une phase hydratée telle que l'ettringite. Après cette phase d'augmentation de masse, le processus est suivie par une perte de masse jusqu'à 400 jours.

Par comparaison entre les différents BAP, nous pouvons remarquer que le BAP10, le BAP20 et BAP30 présentent des pertes de masses moins importantes que ceux du BAPT.

Les résultats des BAP avec ajout et BAPT montrent que la comparaison entre ces deux types de béton est en rapport direct avec l'addition minérale utilisée. Le BAP10, BAP20 BAP30 présente un gain de masse presque similaire. Le BAPT est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium.

b. Evaluation de la résistance à la compression

La mesure des résistances à la compression a été réalisée sur des éprouvettes de $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ immergées dans la solution sulfatique. Les échéances de mesure sont : 28, 90, 180, 360 et 400 jours d'immersion. La Figure IV.25 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion des BAP conservés dans la solution Na₂SO₄.

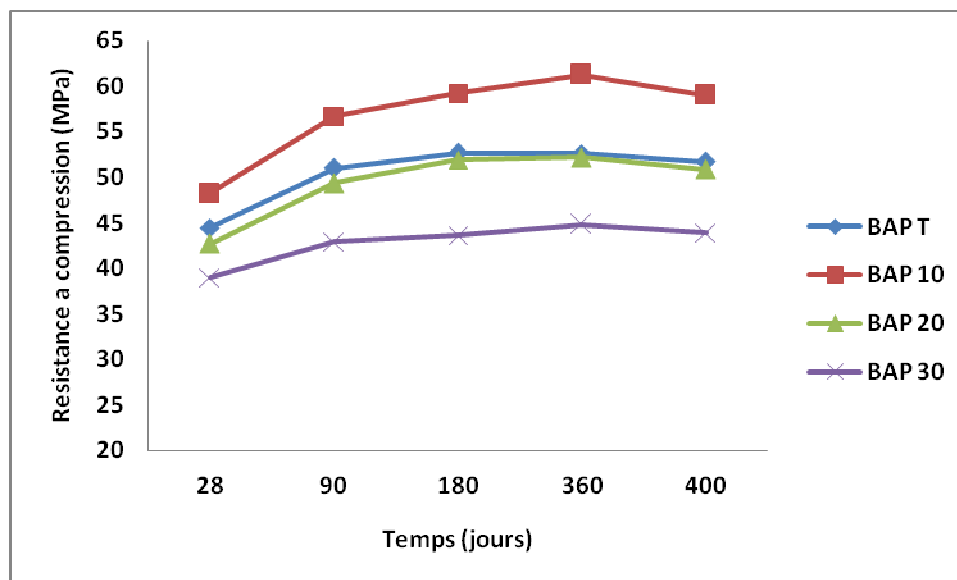


Fig. IV.25: Evolution des résistances à la compression des BAP immergés dans la solution sulfatique (Na₂SO₄)

On remarque que la résistance à la compression évolue positivement durant la période d'immersion jusqu'à 360 jours, est due à la formation de l'ettringite et du gypse qui remplissent les micropores menant à une structure dense. La résistance des BAP tend à diminuer progressivement jusqu'à 400 jours. La chute de résistance est supposée attribuée à la formation du gypse et de l'ettringite expansive causante des micro-fissures dans le béton.

c. L'examen visuel

L'examen visuel des BAP en contact avec les sulfates, est un moyen pour évaluer les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes.

En comparaison des éprouvettes des BAP conservés en solution de Na_2SO_4 après 360 jours (Fig. IV.26), on observe des fissurations au niveau des facettes des éprouvettes.



Fig. IV.26: Etats des surfaces des éprouvettes des BAP immergées dans Na_2SO_4 après 360 Jours

L'examen visuel des BAP, montre des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes et la formation d'une couche blanchâtre sur la surface extérieure des échantillons et qui caractérise le déclenchement de la formation du gypse, ce qui explique la diminution de la masse de ces bétons.

3.4.4 Carbonatation naturelle

Trois échantillons de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ de chacune des formulations des BAP ont été conservés à l'air libre du laboratoire. La mesure de la profondeur carbonatée a été faite après 13 mois d'exposition. Les zones carbonatées sont mises en évidence à la phénolphthaléine : les photos des sections des éprouvettes sont présentées sur la Figure IV.27.



Fig. IV.27: Carbonatation naturelle à 13 mois

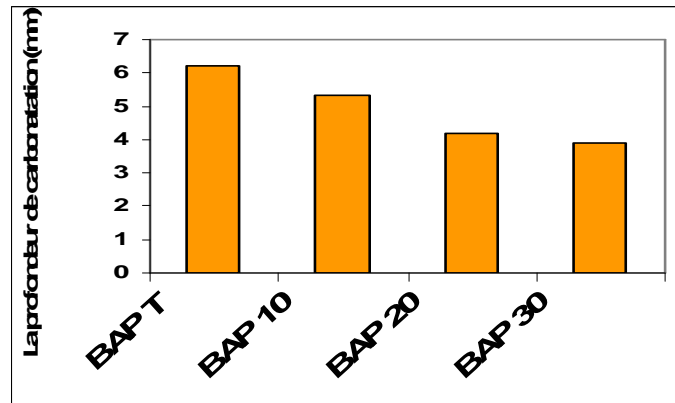


Fig. IV.28: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 13 mois à l'air libre de laboratoire

D'après Les résultats obtenus, la Figure IV.28 montre que le BAPT présente des profondeurs de carbonatation supérieures à celles des BAP à base de bentonite calcinée.

Les données de la littérature montrent des avis contradictoires sur l'effet des additions pouzzolaniques sur le comportement des BAP vis-à-vis de la carbonatation, où plusieurs recherches sur la carbonatation des mortiers et des bétons [Sulapha et al., 2003 ; Khunthongkeaw et al., 2006 ; Sisomphon et al., 2007], rapportent l'effet négatif de la substitution du ciment par la cendre volante. Selon ces recherches, la consommation d'une partie de portlandite par réaction pouzzolanique augmente la profondeur de la carbonatation.

D'autres recherches telles que celles de [Siad, 2010 et Belguesmia, 2012] rapportent l'effet positif des additions pouzzolaniques tels que la cendre volante et la pouzzolane naturelle, la vase calcinée et qui peut être dû à la grande densification de la structure poreuse en présence des additions pouzzolaniques qui rend l'effet de la consommation de la portlandite un effet secondaire. En outre, nous pouvons expliquer cela, par l'hypothèse de Rozière, 2007, qui montre que les additions interviennent sur la carbonatation par la dilution de la chaux du clinker et des additions, et non pas par consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique. Cela semble justifier l'écart constaté sur la cinétique de carbonatation des BAP à base de la bentonite calcinée. En effet, les pourcentages du CaO dans la bentonite calcinée est proche de 4%. Ce pourcentage ajouté à la chaux du ciment CPA CEMI 42.5 qui est de l'ordre de (65%), pourrait ralentir la carbonatation en général dans les BAP et faire la différence entre le BAPT et BAP10, BAP20, BAP30.

3.4.5 Retrait

3.4.5.1 Retrait total

L'hydratation et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent sur les bétons et les mortiers, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe, des déformations de retrait. Les variations spontanées engendrées par le retrait total sont dues aux variations de la teneur en eau provoquées par les réactions d'hydratation et l'évaporation.

Les courbes de retrait total sont représentées à la Figure IV.29 où nous pouvons constater que les amplitudes de retrait total vont de 650 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le BAPT à 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP30, de même les cinétiques diffèrent de façon significative. Par exemple, nous pouvons voir que le taux de retrait des BAP est plus important au jeune âge, par contre il semble se stabiliser plus rapidement. A long terme, la présence de la bentonite diminue le retrait final en fonction du dosage de substitution. La Figure IV.29 montre une évolution de déformation similaire pour tous les BAP, le retrait du BAPT évolue beaucoup plus rapidement et se distingue des autres jusqu'à l'âge de 250 jours avec une amplitude similaire. Les résultats de retrait au jeune âge obtenus pour les bétons testés dans notre étude présentent des déformations de l'ordre de 120 à 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 07 jours pour les BAP qui confirme les résultats de [Bouhamou et al., 2014] mentionne des valeurs que les BAP avec et sans ajouts de la vase calcinée (résistance mécanique entre 35 et 45 MPa) étudiés présentent un retrait à 07 jours de l'ordre de 150 à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

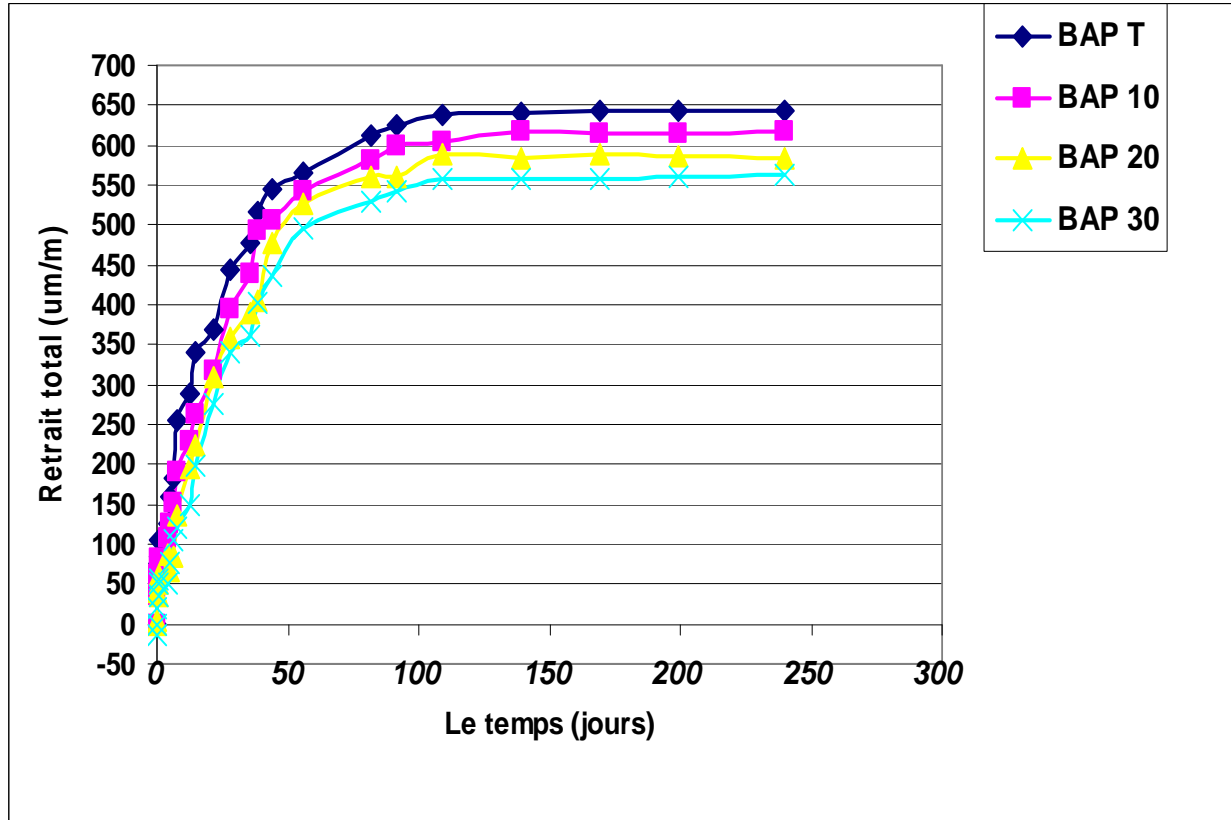


Fig. IV.29 : Retrait total des bétons autoplaçants

3.4.5.2 Retrait endogène

Le retrait endogène (appelé aussi retrait d'auto dessiccation ou retrait d'hydratation) est une conséquence de la consommation interne d'eau par l'hydratation du ciment. On peut étudier le retrait dû à la seule réaction d'hydratation en empêchant tout change d'eau entre les éprouvettes et le milieu extérieur sitôt après le démoulage. Pour y parvenir, les éprouvettes sont couvertes d'un film plastique et disposé verticalement. Il apparait dans la Figure IV.30, que les cinétiques des déformations du retrait endogène des bétons BAP, sont assez semblables, ils présentent des allures similaires et presque identiques aux premiers âges et commencent à se différencier au fur à mesure que nous avançons dans le temps. Evolution du retrait dans le temps ; décrit deux étapes, la première est marquante et rapide jusqu'aux 28 jours la deuxième est assez atténuée et finit par se stabilisée au-delà des 100 jours pour l'ensemble des compositions. Le BAPT présente les déformations les plus élevées, dès les premiers jours et pour toute la durée des essais, celles des BAP avec la bentonite calcinée diminuent avec l'augmentation du dosage.

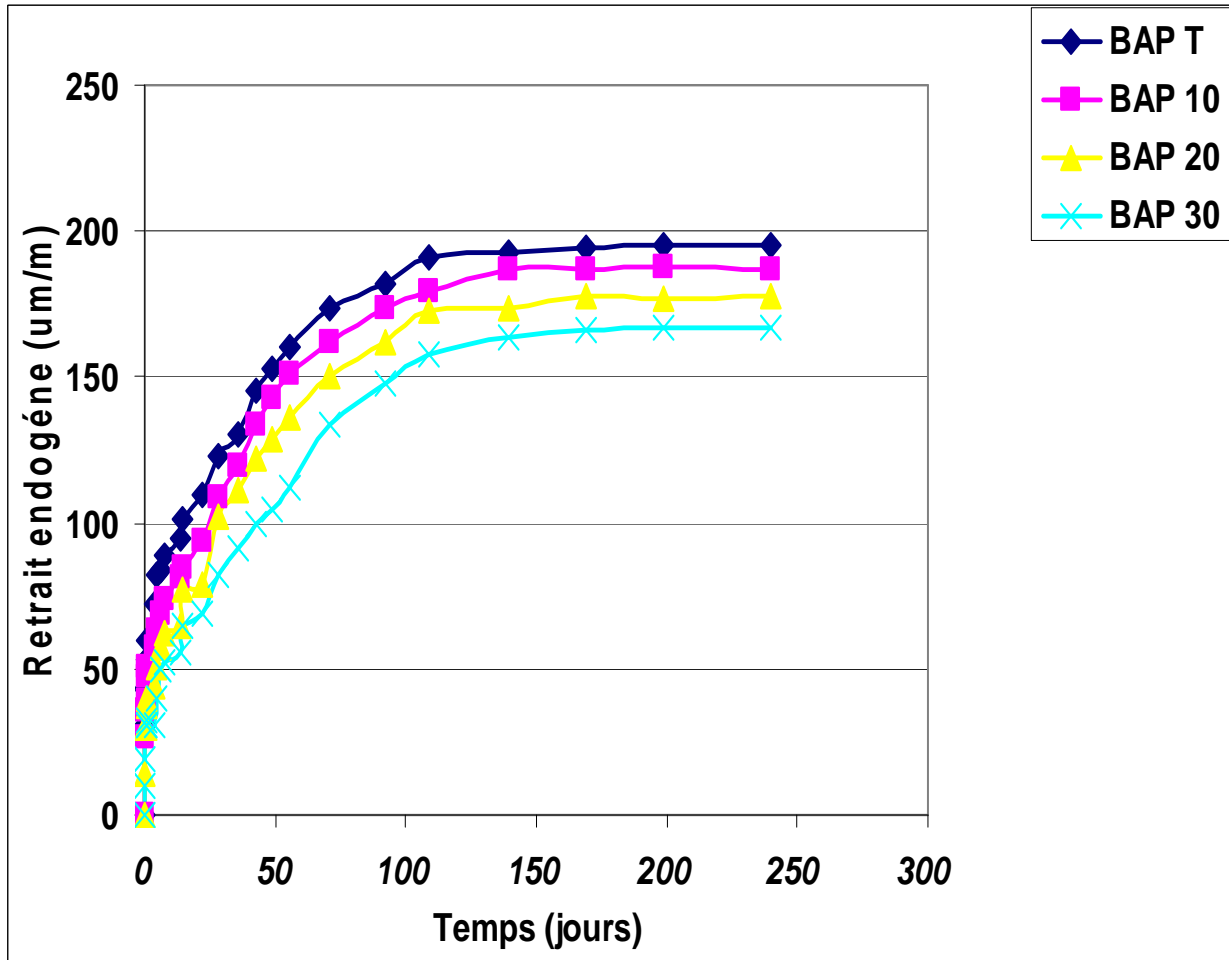


Fig. IV.30 : Retrait endogène des bétons autoplaçants

3.4.5.3 Retrait de dessiccation (ou de séchage)

Il se produit par diffusion de l'eau à travers les faces exposées au séchage en présence d'un gradient hydraulique entre le béton et l'air ambiant. Ce retrait se produit très lentement et dure plusieurs années. On constate sur la Figure IV.31 que les courbes obtenues pour les BAP apparaissent dans un fuseau.

Nous en déduisant que la composante due au séchage n'est quasiment pas modifiée par le rapport (bentonite/Ciment). Durant la première phase ; jusqu'aux 50 jours; l'évolution du retrait des BAP10, BAP20, BAP30 par rapport au BAPT est assez marquante. Par contre dans la deuxième phase cette même évolution commence à ralentir jusqu'à devenir presque constante jusqu'à 100 jours. Nous pouvons noter que la différence entre les valeurs du retrait mesurées a diminué par rapport à la première phase, ce qui prouve que l'amplitude des retraits commence à se stabiliser. Néanmoins quel que soit l'âge, le BAPT présente toujours les valeurs

les plus élevées, par contre pour les BAP10, BAP20, BAP30 leurs valeurs diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en bentonite calcinée. Ces résultats sont en accord avec les observations faites par [Bouhamou et al., 2014].

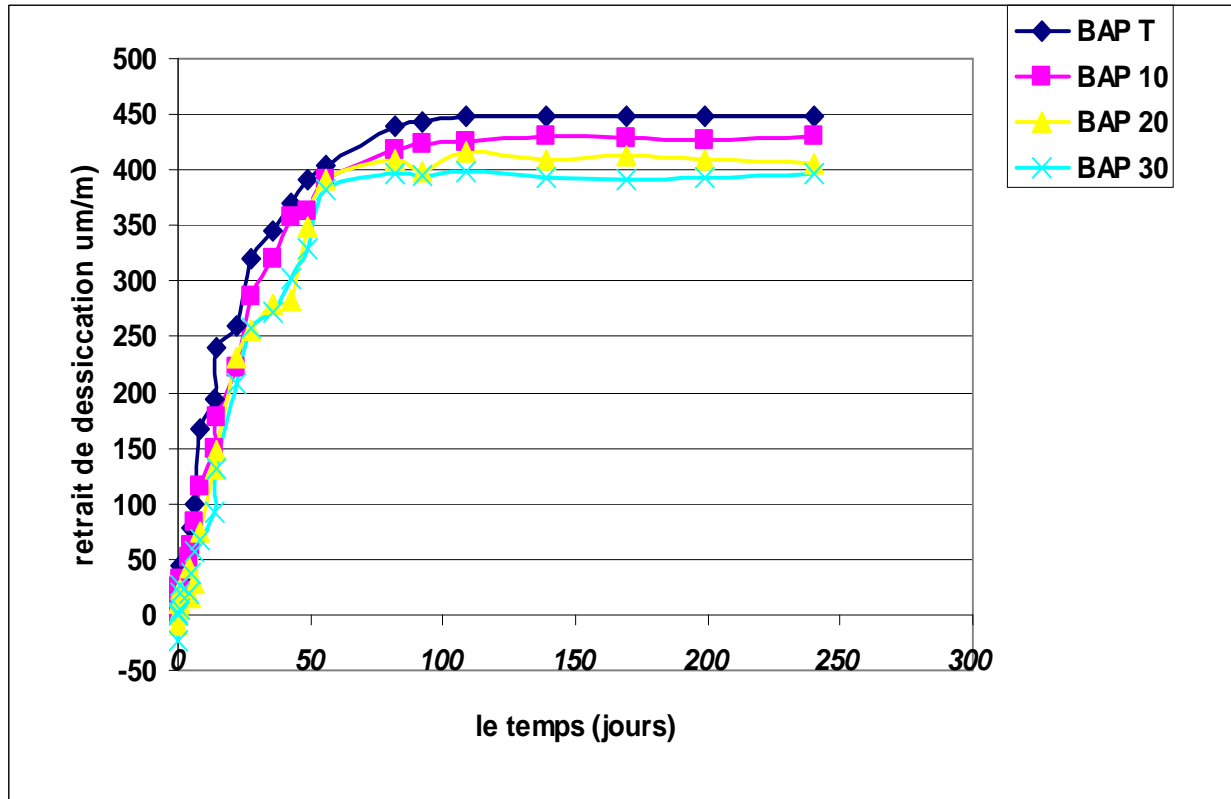


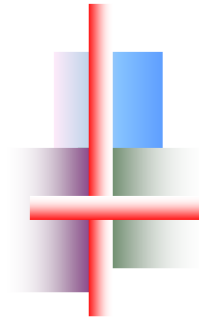
Fig. IV.31 : Retrait de dessiccation des bétons autoplaçants

3.5 Conclusion

Cette deuxième partie de ce chapitre traite de l'effet de l'ajout la bentonite calcinée sur le comportement à l'état frais et durci (la résistance mécanique et durabilité) des bétons autoplaçants. A la lumière des essais réalisés au cours de ce travail de recherche nous pouvons tirer les principales conclusions suivantes :

- La formulation des bétons autoplaçants avec les différents pourcentages de bentonite calcinée ainsi que le béton témoin ont tous répondu aux recommandations de la norme (AFGC 2008).
- Le BAP à base de bentonite calcinée développe des résistances à la compression avec l'âge.
- Les résistances mécaniques à la compression obtenues sont acceptables pour les bétons avec ajout de bentonite calcinée surtout pour le pourcentage de 10%.

- Les BAP10, BAP20, BAP30 émergés dans les acides HCL et H₂SO₄ présente moins de perte de masse que les BAPT conservé dans les mêmes solutions.
- Dans le milieu sulfatique le BAPT présente de perte de masse plus que ceux du BAP avec la bentonite calcinée.
- Les BAP présentent une augmentation continue de la résistance à la compression, ce qui signifie que les attaques sulfatiques n'ont pas beaucoup d'influence sur la résistance mécanique de ces bétons dans la période de 360 jours mais diminuer progressivement jusqu'à 400 jours .
- L'essai de carbonatation montre que les BAP10, BAP20 et BAP30 se carbonatent avec moins de cinétique que BAPT.
- L'analyse des déformations différées libres en conditions endogène et dessiccation en présence de bentonite calcinée indique que cette bentonite contribue à diminuer les amplitudes du retrait par rapport au béton témoin.



Conclusion générale et perspective

L'étude entreprise dans cette thèse est une contribution aux travaux de valorisation des matériaux locaux dans les matériaux cimentaires. Notre étude a permis de confirmer la possibilité de valoriser l'argile de type montmorillonite (bentonite) de la région de Mostaganem en tant que matériau substituable en partie au ciment. Il a été utilisé dans ce travail, différentes teneurs de la bentonite calcinée pour la confection des mortiers (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, et 25%) et des bétons autoplaçants (0%, 10%, 20% et 30%).

Cette dernière présente des intérêts incontestables du point de vue technique, économique, écologique et du point de vue du risque envers les différentes émissions de gaz à effet de serre. Cette approche qui consiste à unir diverses procédures d'ajouts de matériaux pour la valorisation se montre de plus en plus réceptive à la nouvelle façon d'empêcher ou d'atténuer les risques environnementales.

Une étude bibliographique a été présentée au début de ce mémoire pour mettre en relief le béton autoplaçant et les ajouts minéraux en général et la bentonite en particulier. Il a permis aussi de mettre en évidence la formulation et la durabilité du béton autoplaçant, l'effet des ajouts minéraux sur les caractéristiques des mortiers et des bétons.

Aussi, il a été décrit dans ce mémoire, les différents travaux de recherche qui ont été menés dans le même contexte.

Comme contribution à ces travaux, il a été réalisé dans cette étude, une série d'essais expérimentaux pour l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés à savoir le ciment, la bentonite calcinée, et les granulats dans la première partie expérimentale. Dans la deuxième partie expérimentale, il a été montré l'effet de la bentonite calcinée avec différents pourcentages sur le comportement du mortier et le béton autoplaçant à l'état frais et l'état durci.

Les résultats expérimentaux obtenus à travers cette étude permettent de dégager un certain nombre de conclusions générales.

L'augmentation du pourcentage de la bentonite calcinée dans le ciment a présenté les effets suivants :

- Augmentation de la finesse des liants.

- Augmentation du pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O et Na_2O) et diminution du taux d'oxyde de chaux (CaO).
- Diminution du temps de début de prise et de fin de prise.
- Diminution de la résistance à la traction et à la compression du mortier à court terme, et un peu à long terme.
- Activité pouzzolanique à 7 jours, 28 ou 90 jours est supérieure à 70% pour les différents mélanges.
- A l'état frais toutes nos formulations de BAP ont été qualifiées d'autoplaçantes selon les spécificités de l'AFGC 2008.
- Les résistances mécaniques à la compression obtenues sont acceptables pour les bétons avec ajout de bentonite calcinée surtout pour le pourcentage de 10%.
- Toutefois il est intéressant de constater que même avec 30 % de substitution, la résistance à la compression à 28 jours reste dans des limites raisonnables de 30 MPa préconisée par les différents cahiers de charges de construction pour les bétons de bâtiment.
- Le BAPT est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium Na_2SO_4 et les attaques acides (H_2SO_4 , HCl) surtout à long terme.
- Les BAP10, 20, 30 émergés dans les acides HCl et H_2SO_4 présente une perte de masse moins que le BAPT conservé dans les mêmes solutions.
- Les BAP10, 20, 30 émergés dans le sulfate Na_2SO_4 présente une perte de masse moins que le BAPT conservé dans les mêmes solutions.
- L'effet positif de la bentonite calcinée sur la résistivité des BAP envers la carbonatation naturel.
- La bentonite calcinée contribue à diminuer les amplitudes du retrait par rapport au béton témoin.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la bentonite calcinée permet d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques des produits cimentaires et le béton autoplaçant. Compte tenu de l'évolution générale vers l'utilisation de produits à haute qualité environnementale, la bentonite peut être valorisée et utilisée pour des matériaux de construction en respectant au mieux les ressources naturelles et l'environnement.

Perspectives et recommandations

A la lumière des conclusions exposées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivantes :

- L'utilisation d'argiles mixtes à basse teneur en kaolinite comme substituant du ciment dans la construction.
- Utilisation d'autres types d'ajouts disponibles en Algérie pour la valorisation dans le béton autoplaçant et autres.
- Étude de l'effet des combinaisons des ajouts minéraux avec différents pourcentages sur le béton autoplaçant.
- Effectuer une étude technico-économique sur les différentes procédures de valorisation des ajouts minéraux pour permettre un choix judicieux.
- Une analyse microstructurale plus poussée doit être entreprise afin de conforter les résultats de cette étude.

Références bibliographiques

- Ayed K, Vidal T, Pons G, Benaïssa A, "Influence du type d'addition minérales sur les déformations différées des bétons autoplaçants", Thèse INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 2006.
- Ayed K, Benaïssa A, Vidal T, Pons G, Abidlah A : « étude du comportement diffère du BAP l'influence de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur le retrait du béton auto plaçant » 1St International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- Assie S., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Durabilité des bétons autoplaçants », Institut National des Sciences Appliqués de Toulouse, le 29 Octobre 2004.
- Audenaert K., De Shutter G., "Chloride penetration in self compacting concrete" Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp, 818-825, 17-20 august, 2003.
- Aïtcin P. C., Neuville A. et Acker P., «Les différents types de retrait du béton», Bulletin du LCPC 215, réf, 4184, pp, 41-51, mai - juin 1998.
- Audenaert K., De Shutter G., «Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete», Proceeding (SP 212) of the Dixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp, 451-465, juin 2003.
- Aïchouba Ali.A., "effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » thèse de magister, IGCM ORAN – 2005.
- Association Française de Génie Civil (AFGC), Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants, Documents scientifiques et techniques, (2008).
- Brunetaud X., Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, «Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton », Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris, le 08 Décembre 2005.
- Bouzoubaa N. et M. Lachemi, Bétons Autoplaçants; Synthèse bibliographique, Rapport de recherche CEBTP, centre Saint-Remy, N°: 98-004/98-006, juillet 1999.
- Bouzoubaa N. and M. Lachemi, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 413-420.
- Brindley G.W., Sharp J.H., Patterson J.H., Narahari A. "Kinetics and mechanism of dehydroxylation processes", American Mineralogy, vol. 52, p201-211, 1967.

- Belas N., N. Besseghier, A. Mebrouki et N. Bouhamou, Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton, *Matériaux et Techniques*, 97, N°4, (2009) 231-240.
- Beniremour B. C., « Matériaux pouzzolainique: étude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane », mémoire de fin d'étude ingénieur - IGCM ORAN- 1993.
- Bouhamou N, Belas N, Mebrouki A, Mesbah H, Ammar Y, "Étude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux", Doctorat d'État, Université de Mostaganem, Algérie, 2004.
- Bouhamou N., Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état frais et durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux Algériens». Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem. Algérie (2008).
- Bouhamou N, Mostefa F, Mebrouki A, Belaribi N , Mesbah A.H. Etude du comportement d'un béton autoplaçant _a base de vase de dragage vis-_a-vis du retrait. *matériaux 2014 - Colloque Ecomateriau*, Nov 2014, Montpellier, France. Collection ecomateriau, 2014. <hal-01144447>.
- Belaribi .O « durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane » thèse de doctorat, université de Mostaganem 2015.
- Braquenier J-C.et Desnyter J, le béton autoplaçant ou autocompactant, 2000.
- BENTAL: Bentonite Company of Algeria, 2011.
- Boutarfa M « Caractérisation physique et rhéologique de la bentonite de Maghnia » thèse de magister université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Oran 2012.
- Billberg P., "Influence of filler characteristics on SCC rheology and earlyhydration", *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- Baron J. et Ollivier J.P., « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.
- Belguesmia K., « Comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton autoplaçant à base de sédiment de dragage », Thèse de Magister, Université de Mostaganem, 2012.
- Bibi .M, Chikouche M.A.and. Ait tahar K Influence des ajouts d'argiles gréseuses ou/et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires, *Matériaux et Techniques*, 96, N°4-5, (2008) 165-172.

- Belaribi. O, Belas N, Aggoun S, Bendani K, Bouhamou N, Mebrouki A, Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self compacting concrete, Cement Wapno Beton CWB, 6/ (2014).
- Benasla. M, Hadjel M, Benamara L et Ouhba K, "Caractérisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda et leur valorisation comme un ajout artificiel dans le ciment" Matériaux & Techniques 104, 304 (2016).
- Comparet C., Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifiants du béton», Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot, le 8 Octobre 2004.
- CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- Capmas A., «Béton et développement durable», la durabilité des bétons, Presse de l'école des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- Carde C., «Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés due à la lixiviation des matériaux cimentaires», Thèse de Doctorat, I,N,S,A Toulouse, 1997.
- Colin D. (2000) Etude de la durabilité d'une vase de dragage traitée aux ciment et additifs, Rapport de DEA, Université de Caen. 34p.
- Çokça E. (2001) Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil, Journal of Geotechnical and Géoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 7, July (2001); pp. 568-573.
- Croisé R. (1964) Traitement des sols aux liants hydrauliques, Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Nancy, pp. 427-438.
- Dron R. L'activité pouzzolanique. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, 1978, vol. 93, pp. 66-69.
- Davood N, Siham K B Etude du retrait et des propriétés de transport d'Eco-BAP à base d'additions minérales 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.
- Dérivé M., A.Esme : la bentonite : les argiles colloïdales et leur emploi, livre 1951.
- El hilali A, E.Ghorbel E, Gonnon P, "Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants", Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants, Bruxelles, août 2005.
- Gniewek J., « Réactivité des Montmorillonites calcinées. Utilisation dans le génie civil », Thèse INSA de Lyon, 184p, (1987).

- Ghrici M., Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle. Thèse de doctorat d'état en génie civil. USTMB d'Oran, Algérie (2006).
- Geryville D., L. Kacimi, M. Cyr, P. Clastres, Elaboration de pouzzolanes artificielles à partir de déchets industriels pour une substitution partielle du clinker dans le ciment Portland, INVACO2, Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction N° 1P-048, Université Mohamed V, Rabat, Maroc, (2011).
- Gram H. - E., Piiparinen P., "Properties of SCC – Especially early age and long termshrinkage and salt frost resistance", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15 septembre 1999.
- Hasni L, Bétons Autoplaçants, Synthèse Bibliographique Rapport de Recherche N°. 98-004 /98-006, CEBTP, Juillet 1999.
- HOLCIM, Le béton autocompactant, recommandation éditées par HOLCIM, Suisse, novembre 2005.
- Haddad O, Aggoun S, Cabrillac R, « Influence des addition minérales sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants », Université de Cergy-Pontoise, France, 2003.
- Hu C. et Barbieri B., « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.
- Hugh Swaine Spence; « Bentonite » 3%Canada. Mines Branch (1901-1936), Ottawa, F.A. Acland, 1924.
- Khayat K. H., workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, aci materials journal, V. 96, No. 3, May-June 1999.
- Kostuch J.A., Walters G.V., Jones T.R., "High performance concrete incorporating metakaolin", Concrete 2000, University of Dundee, p. 1799-1811, 1993.
- Kouloughli S « étude expérimentale des mélanges sable bentonite » thèse de magister université Mentouri Constantine 2007.
- Khélifa R., «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.

- Khelifa R., Brunetaud X., Almkhatar M., « Conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur des bétons autoplaçants », XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008.
- Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul S. and Leelawat, T., «A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete», Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 9, pp. 744-753, 2006.
- Lachemi M., K. M. A. Hossain, V. Lambros, P.-C. Nkinamubanzi and N. Bouzoubaa, Self-Consolidating Concrete Incorporating New Viscosity modifying Admixtures, Cement and Concrete Research 34 (2004), pp 917-926.
- Laoufi L., Comportement Mécanique et Structurel du Béton dans un Environnement Agressif, thèse de doctorat, ENPO, Oran, Algérie (2015).
- Laoufi. L, Contribution à l'étude des caractéristiques physicomécanique des bétons à base de ciment pouzzolanique, Thèse de magister soutenue à l'ENSET d'Oran (Algérie), 2002 .
- Lea F.M. Testing of pozzolanic cements. Cements technology, 1973, vol. 41, pp. 21-25
- Leroux A., S. Orsetti “ les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés ” Bulletin de liaison des Laboratoires Centrales des Ponts et Chaussées, N° 225, Réf 4316, pp 41-50 Mars-Avril -2000.
- Menai K Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, Canada, Septembre, 1995.
- Mirza J., M. Riaz, A. Naseer, F. Rehman, A.N. Khan, Q. Ali: Pakistani bentonite in mortars and concrete as low cost construction material, journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat 2009.
- Merdia A., Talah A., Kharchi F. et Chaid R., “Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté”, Colloque International CMEDIMAT 2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.
- Mather B., « Sulphate attack on hydraulic cement concrete », Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p12-23, 2000.
- Mamillan M. “ Restauration des bâtiments en béton armé ” Techniques de l'ingénieur, traité construction, C2III , pp. C2350-1, C2350-14-1993.
- Mebrouki A. «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem – juin 2003.
- Mebrouki A, Belas N, Bouhamou N, «Contribution à la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux », Université de Mostaganem, 2007.
- Mehta P. K., “Concrete: structure, properties and materials”; Prentice-Hall, p, 105-169, Ed, 1986.

- Minoux M. A. (1994) Cendres volantes et microcendres: Procédés d'obtention, conséquences physiques et chimiques sur le système microcendres–ciments–eau, Thèse de Génie civil, INSA, Toulouse. N°271, 225 p.
- Mehta P.K., «Evaluation of sulfate resisting cements by a new test method », Journal ACI. 72 (40), pp. 573-575, 1975. Mehta P.K., « Studies on blended Portland cements containing cements containing ...santorin earth », Cement and Concrete Research, Vol.11, pp. 507-518- 1981.
- Nagataki S. and H. Fujiwara, Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI SP 154-16, pp 301-314, June 1995.
- Necira B, Guettala A, Chabi S, "Formulation des bétons autoplaçants : effet des ajouts minéraux et des adjuvants", Doctorat d'État, Université de Biskra, Algérie.
- Neville A. M. " Propriétés des bétons" édition Eyrolles, Paris, pp. 463-506 -2000.
- Okamura H. et al., "Self-compacting high performance concrete", Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, pp.2381-2388, (1995).
- Petersson Ö., Billberg P. and Van B.K., "A model for Self- Compacting Concrete», International Rilem Conference on Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, (1996).
- Pavoine A., «Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite», Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003.
- Pichon H. , P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.
- Pons G., Proust E. and Assie S., "Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?", Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- Persson B., " Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete ", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999.
- Rackel S.N., « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash » Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.
- Rebouh N, " Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant", Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2006.

- Rich C. Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, 263 p.
- Roziere E., « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- Rougeau P., Guiraud P., «La durabilité dans le contexte normatif européen», la durabilité des bétons, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- Rougeau P., Maillard J. L. and Mary-Dippe C., "Comparative Study on properties of selfcompacting concrete and high performance concrete used in precast construction", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp, 251- 261, 13-15 September 1999.
- Roy D.M., Arjunan P., Silsbee, M.R., Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete, Cement and Concrete Research, 2001, Vol.31, 12, p1809- 1813.
- Rissel khelifa M « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplçants » Thèse de Doctorat, université de Constantine 2009.
- Rahmani H., Ramzianpour A.A., «Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes». Asian Journal of Civil Engineering (building and housing) VOL. 9, Nbr. 3, pp 303-319, 2008.
- Ross, C.S., and Shannon, E.V. (1926) The minerals of bentonite and related clays and their physical properties. Journal of the American Ceramic Society, 9, 77–96.
- Shindoh T and Yaasunori M, Development of Combination-Type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods, Journal of Avanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, 26-36, April 2003.
- Sersale R., "Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI-17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Paris 1980.
- Sedran T. « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- Shi C. and R.L. Day: "Pouzzolanic reaction in the presence of chemical activators". Part 2 – Reaction Products and Mechanism – Cement and Concrete Research – Vol 30 — pp 607 617- 2000.
- Samet B. and al, "Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements Formulation of blended cement", Cement and Concrete composite, Vol.29, p741-749, 2007.
- Samara M, Roziere E, Khokhar M, Loukili A, "Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplçants", Projet ANR-RGCU SEDIBET, 2007.

- Siad H., «La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires», Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- Shazim A M, Rao A, Sardar K, and Tommy Y L: Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete, journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat 2012.
- Senhadji Y., L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates). Thèse de doctorat, USTO – Oran (2013).
- Siad H., Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, France (2010).
- Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S., «Carbonation of concrete containing mineral admixtures». J. Mater. Civil Eng.; 134 43, 2003.
- Sisomphon K., Franke L., «Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials», Cement and Concrete Research, pp. 1647–1653, 2007.
- Sakata K., “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- Sonebi M. and Bartos P.J.M. , “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.
- Turcry PH, “Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.
- Tang L., Andalen A., Johansson J. O. and Hjelm S., «Chloride diffusivity of self-compacting concrete», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp, 187-198, 13-15 September 1999.
- Turcry PH. et A. Loukili, Différentes approches pour la formulation des BAP, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.
- Tangtermsirikuls S., Sakamoto J., Shindoh T. and Matsuoka Y.H., “Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent”, Taisei Technical Research Report, pp.369-376, 1991.
- Venuat M – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- Van B. K. and Montgomery D., “Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 227-238, 13-15 septembre 1999.

- Zhu W., Quinn J., Bartos P. J. M., «Transport properties and durability of self-compacting concrete», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp, 451-458, 23-25 October 2001.
- Zhu W., Bartos P. J. M., «Permeation properties of self-compacting concrete», Cement and Concrete Research, 33, pp, 921-926, 2003.
- Zivica. V. , M. T. Palou, Physico-chemical characterization of thermally treated bentonite, Composites: Part B 68: (2015) 436-445.

Les normes

- NF EN 934-2, « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- ASTM C267, “Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer Concretes”. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2001.
- EN V 197 – 1" Ciment: composition, spécifications et critères de conformité – Partie1: ciments courants " AFNOR – Paris- 1996.
- NF EN 196 – 3 " méthodes d'essais des ciments : détermination du temps de prise et de la stabilité " AFNOR – Paris – 1996.
- EN V 197 – 1" Ciment : composition , spécifications et critères de conformité – Partie 1 : ciments courants " AFNOR – Paris- 1996.
- Confection des mortiers : EN 196-1
- ASTM C 1012- 95A, “Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution”, Annual Book of ASTM Standards, volume 04.01 cement; lime; gypsum, 2004.
- Norme Européenne EN 206-1«Béton. Partie1: Specification, performance, production et conformité». AFNOR, avril 2004.
- Norme Française NF P 18-508, « Additions pour béton hydraulique- Additions alcalines-Spécifications et critères de conformité », AFNOR, juillet1995.
- Norme Française XPP 18-305«Béton, Béton Prêt à l’Emploi», 1996.